

ISSN 2782-4004 (print)

iPolytech Journal

Tom 25, № 6. 2021 / Vol. 25, № 6. 2021

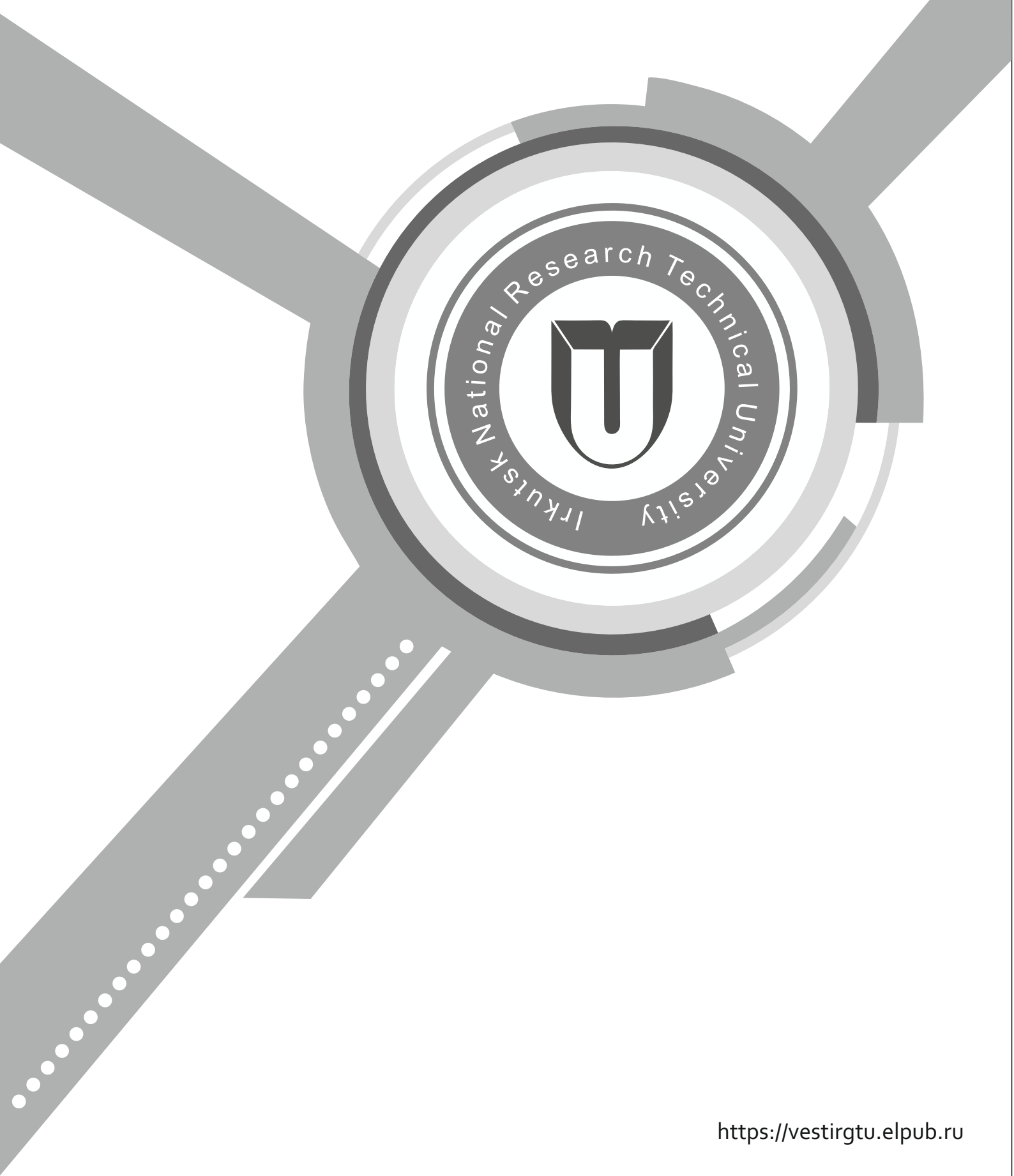


<https://vestirgtu.elpub.ru>

ISSN 2782-4004 (print)

iPolytech Journal

Tom 25, № 6. 2021 / Vol. 25, № 6. 2021



<https://vestirgtu.elpub.ru>

ISSN 2782-4004 (print)

iPolytech Journal

Том 25, № 6. 2021 / Vol. 25, № 6. 2021



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издательство
Иркутского национального исследовательского
технического университета

Периодичность издания – 6 раз в год.

Учредитель:
Иркутский национальный исследовательский
технический университет

Подписной индекс в каталоге Агентства АО ИД
«Экономическая газета»: «Объединенный каталог.
Пресса России. Газеты и журналы» -
41476 (ОК + ЭК)
Адрес АО ИД «Экономическая газета»:
125319, г. Москва, ул. Черняховского, 16,
помещение 1, комната 17.
Тел.: (499) 152-86-11

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

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

ISSN 2782-4004 (print)

iPolytech Journal

Tom 25, № 6. 2021 / Vol. 25, № 6. 2021

SCIENTIFIC JOURNAL

Publishers
of Irkutsk National Research
Technical University

Frequency of publication – 6 times a year.

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":
Ekonomicheskaya Gazeta CJSC Publishing House 16,
Chernyakhovsky St., block 1,
room 17, Moscow 125319.
Phone: (499) 152-86-11

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

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



Редакционная коллегия

- СИДОРОВ Д.Н.**, д. ф.-м. н., профессор РАН, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, главный редактор (г. Иркутск)
- КОРНЯКОВ М.В.**, д.т.н., ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, председатель редакционной коллегии (г. Иркутск, Россия)
- ЗАЙДЕС С.А.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение и материаловедение» (г. Иркутск, Россия)
- НЕМЧИНОВА Н.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Металлургия и материаловедение» (г. Иркутск, Россия)
- СУСЛОВ К.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Энергетика» (г. Иркутск, Россия)
- БАЖИН В.Ю.**, д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)
- БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю.**, д.т.н., профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия)
- БОЛДЫРЕВ А.И.**, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия)
- БОРОВИКОВ Ю.С.**, д.т.н., 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)
- ГАВЛИК ЮЗЕФ**, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (г. Краков, Польша)
- ЗАКАРЮКИН В.П.**, д.т.н., профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)
- КАРПЕНКО Е.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой лаборатории плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)
- КЛЕР А.М.**, д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- КОЛОСОК И.Н.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- КРЮКОВ А.В.**, д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)
- КУРБАЦКИЙ В.Г.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- МАМЯЧЕНКОВ С.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)
- МАТЛИН М.М.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, Россия)
- МЫМИРИН В.А.**, д.г.-м.н., профессор, Федеральный университет штата Парана (Куритиба, Бразилия)
- НОВИЦКИЙ Н.Н.**, д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- ОГАР П.М.**, д.т.н., профессор Братского государственного университета (г. Братск, Россия)
- ПАЗДЕРИН А.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)
- ПАНТЕЛЕЕВ В.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)
- СЕНДЕРОВ С.М.**, д.т.н., заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- СТЕННИКОВ В.А.**, д.т.н., профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- СТЫЧИНСКИ З.А.**, профессор Университета Отто-фон-Герике (г. Магдебург, Германия)
- ТЮРИНА Э.А.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- ФАНГ ЛЮ**, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай)
- ФЕДЯЕВ А.А.**, д.т.н., заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Братского государственного университета (г. Братск, Россия)
- ХЕЙФЕЦ М.Л.**, д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)
- ФИШОВА Г.**, д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)
- ШОЛЬТЕС Бертольд**, директор Института материаловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

Editorial board

- Denis N. SIDOROV**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
- Mikhail V. KORNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia)
- Semen A. ZAIDES**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
- Nina V. NEMCHINOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
- Konstantin V. SUSLOV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Deputy editor-in-chief in Power Engineering (Irkutsk, Russia)
- Vladimir Yu. BAZHIN**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)
- Valery Yu. BLUMENSTEIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)
- Aleksander I. BOLDYREV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)
- Yury S. BOROVNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)
- Nikolay I. VOROPAI**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Josef GAVLIK**, Advanced Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)
- Vasily P. ZAKARYUKIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Department of Transport Electricity, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
- Evgeniy I. KARPENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies, Institute of Physical Materials Science, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
- Aleksander M. KLER**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Viktor G. KURBATSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Irina N. KOLOSOK**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Andrey V. KRYUKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
- Sergey V. MAMYACHENKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)
- Mikhail M. MATLIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
- Vsevolod A. MYMRIN**, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil)
- Nikolay N. NOVITSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Pyotr M. OGAR**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Bratsk State University (Bratsk, Russia)
- Andrey V. PAZDERIN**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
- Vasily I. PANTELEEV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Electrical Systems, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
- Sergey M. SENDEROV**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Valery A. STENNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Zbigniew A. STYCZYNSKI**, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)
- Elina A. TYURINA**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Liu FANG**, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)
- Aleksander A. FEDYAEV**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering, Bratsk State University (Bratsk, Russia)
- Mikhail L. KHEIFETS**, Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)
- Aleksander G. FISHOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)
- Berholt SCHOLTES**, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany)

**Содержание**

692

Машиностроение и машиноведение

Зайдес С. А., Хо Куан Минь, Май Нгиа Дик. Влияние секториального радиуса деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние в зоне контакта с цилиндрической поверхностью.....	696
Ишенин Д. А., Говорков А. С. Проектирование технологических операций на основе параметров производственной технологичности конструкции изделия, с использованием алгоритма автоматизированного проектирования.....	708
Поляков П. А. Исследование сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска с определением взаимосвязи аэродинамических и теплообменных характеристик воздушного потока.....	720

Энергетика

Бузунова М. Ю. Анализ температурно-частотного воздействия на диэлектрические потери в зерновой среде.....	733
Гиршин С. С., Андреева Е. Г., Хацевский К. В., Троценко В. М., Мельников Н. А., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Управление мощностью регулируемых конденсаторов в электрических сетях по критерию минимума потерь энергии.....	741
Го Вэйжу, Лю Фан. Новый критерий асимптотической устойчивости нейронных сетей Хопфилда с переменным запаздыванием.....	753
Степанова Е. Л., Овчинников А. П. Определение средних удельных капиталовложений ПГУ с газовыми турбинами в диапазоне мощностей 30-125 МВт, введенными в эксплуатацию на российских ТЭС в период 2015–2020 гг. и сравнительный анализ с данными периода 2010–2014 гг.	762

Металлургия и материаловедение

Алешин Д. С., Крашенинин А. Г., Зайцева П. В., Танутров И. Н. Термодинамическое моделирование обжига сульфидного молибденового концентрата с гидроксидом кальция.....	773
Бельский С. С., Зайцева А. А., Тютрин А. А., Исмоилов З. З., Баранов А. Н., Сокольников Ю. В. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства.....	782
Королев А. А., Сергейченко С. В., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С. Пироэлектрометаллургическая переработка висмутсодержащих оксидов.....	795

Content

693

Mechanical engineering and machine science

Zaides S. A., Ho Quan Minh, Mai Nghia Duc. Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface.....	696
Ishenin D. A., Govorkov A. S. Engineering working operations based on parameters of product manufacturability using a computer-aided design algorithm.....	708
Polyakov P. A. Study of a segmented ventilation system of the brake disc and determination of the aerodynamic and heat exchange characteristics of the airflow.....	720

Power engineering

Buzunova M. Yu. Analysis of the temperature-frequency effect on dielectric losses in a grain medium.....	733
Girshin S. S., Andreeva E. G., Khatsevskiy K. V., Trotsenko V. M., Melnikov N. A., Petrova E. V., Goryunov V. N. Power management of variable capacitors in electrical grid systems according to the criterion of minimum energy loss.....	741
Guo Weiru, Liu Fang. A new criterion of asymptotic stability for Hopfield neural networks with time-varying delay.....	758
Stepanova E. L., Ovchinnikov A. P. Determination of average relative capital investment of 30–125 MW combined-cycle plants commissioned at Russian thermal power plants in 2015–2020. Comparative analysis with data obtained in 2010–2014.....	762

Metallurgy and materials science

Aleshin D. S., Krashenin A. G., Zaitseva P. V., Tanutrov I. N. Thermodynamic modelling of roasting of molybdenum sulphide concentrate with calcium hydroxide.....	773
Belskii S. S., Zaitseva A. A., Tyutrin A. A., Ismoilov Z. Z., Baranov A. N., Sokolnikova Yu. V. Current state of steelmaking slag processing.....	782
Korolev A. A., Sergeichenko S. V., Timofeev K. L., Maltsev G. I., Voinkov R. S. Pyroelectro-metallurgical processing of bismuth-containing oxides.....	795



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal».

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

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия

Dear Readers!

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

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

"iPolytech Journal" is included in the "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 "iPolytech Journal" 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

Original article

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-696-707>

Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface

Semen A. Zaides¹, Quan Minh Ho^{2✉}, Nghia Duc Mai³^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia³ Air Force Officer's college, Nha Trang, Viet Nam¹zsahaus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7750-7497>²minhquanho2605@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0488-0290>³ngghiamaiduc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6124-3231>

Abstract. This paper aims to determine the effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the center of elastoplastic deformation and residual stresses in the hardened zone of the surface layer of cylindrical workpieces. A mathematical model of local loading was constructed using the finite element method and ANSYS software. This model was used to determine the values of temporary and residual stresses and deformations, as well as the depth of plastic zone, depending on the sector radius of the working tool. The simulation results showed that, under the same loading of a cylindrical surface, working tools with different sector radii create different maximum temporary and residual stresses. An assessment of the stress state was carried out for situations when the surface layer of a product is treated by workpiece-deforming tools with a different shape of the working edge. It was shown that, compared to a flat tool, a decrease in the radius of the working sector from 125 to 25 mm leads to an increase in the maximum temporary and residual stresses by 1.2–1.5 times, while the plastic zone depth increases by 1.5–2.4 times. The use of a working tool with a flat surface for hardening a cylindrical workpiece ensures minimal temporary residual stresses, compared to those produced by a working tool with a curved surface. A decrease in the radius of the working sector leads to an increase in temporary residual stresses by 2–7%. The plastic zone depth ranges from 1.65 to 2.55 mm when changing the sector radius of the working tool.

Key words: plastic surface deformation, elastic-plastic state, working tool, temporary stress, residual stress, computer modeling

For citation: Zaides S. A., Ho Quan Minh, Mai Nghia Duc. Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):696–707. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-696-707>.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.787.4

Влияние секториального радиуса деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние в зоне контакта с цилиндрической поверхностью

Семен Азикович Зайдес¹, Куан Минь Хо^{2✉}, Нгиа Дик Май³^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия³ Офицерское училище Военно-Воздушных Сил, г. Нячанг, Вьетнам¹zsahaus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7750-7497>²minhquanho2605@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0488-0290>³ngghiamaiduc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6124-3231>

Резюме. Целью данной работы является определение влияния секториального радиуса рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние в очаге упругопластической деформации и остаточных напряжений в упрочненной зоне поверхностного слоя цилиндрических деталей. Для достижения поставленной цели использован метод конечных элементов на основе компьютерной программы ANSYS для построения математической модели локального нагружения, позволяющей определить значения временных, остаточных напряжений и деформаций в зависимости от секториального радиуса рабочего инструмента. Представлены результаты моделирования и определения влияния секториального радиуса рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя, включая определение временных и остаточных напряжений, глубины пластической зоны. Полученные результаты компьютерного моделирования подтверждают, что при одинаковых условиях нагружения на цилиндрическую поверхность рабочий инструмент с разными секториальными радиусами создает разные значения максимальных временных и остаточных напряжений. При этом в случае воздействия на цилиндрическую заготовку рабочего инструмента с плоской поверхностью формируются минимальные значения временных остаточных напряжений по сравнению с результатами, полученными при упрочнении криволинейным рабочим инструментом. С уменьшением радиуса рабочего сектора увеличиваются значения временных остаточных напряжений в пределах от 2 до 7%. Глубина пластической зоны при изменении секториального радиуса рабочего инструмента находится в интервале 1,65–2,55 мм.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, упругопластическое состояние, рабочий инструмент, временное напряжение, остаточное напряжение, компьютерное моделирование

Для цитирования: Зайдес С. А., Хо Куан Минь, Май Нгиа Дик. Влияние секториального радиуса деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние в зоне контакта с цилиндрической поверхностью // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 696–707. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-696-707>.

INTRODUCTION

The technologies of surface plastic deformation (SPD) are widely used to improve the quality and mechanical properties of the surface of machined parts. Hardening treatment by SPD improve such parameters, as wear and corrosion resistance, fatigue strength, tightness, etc. It has been shown that SPD contributes to an increase in the safety margins of products operated under variable loads by 1.5–3 times, and their lifespan by dozens of times [1–4].

However, conventional SPD methods have a number of technological limitations when applied to hardening long-span and low-rigidity cylindrical parts, e.g. shafts and axles. Thus, even under the conditions of low output, it is hard to achieve the specified accuracy of diametral dimensions and the stability of the geometric shape of non-rigid cylindrical parts. Another significant problem in the manufacture of such parts is the distortion of their rectilinear axis [4]. As a result, the products manufactured using SPD either fail to meet the established requirements or demonstrate failures and breakdowns in the course of further operation.

When using SPD for treating non-rigid cylindrical parts, e.g. shafts and axles, it is difficult to obtain the specified quality, since a high radial load from the working tool distorts the shape of the workpiece, failing to provide the stability of mechanical properties along its length. At the

same time, a reduction in the radial load does not always ensure the required quality of the surface layer under an acceptable productivity level.

The described limitations can be overcome by intensifying the stress state in the deformation zone, providing for the required degree of hardening at a constant radial interference. We developed a new design of the working tool for SPD based on a sectorial pendulum, the effect of which on the stress-strain state of the surface layer must be assessed.

In this work, we aim to determine the effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the center of elastoplastic deformation and residual stresses in the hardened zone of the surface layer of cylindrical parts.

ANALYSIS OF A KNOWN SOLUTION

Specialists at the Irkutsk National Research Technical University developed a new hardening method based on oscillating smoothing of such workpieces as shafts and axles [5]. The method uses the oscillating motion of a deforming tool, which is a flat plate with a spherical radius (fig. 1). Despite a number of distinct advantages, the method has limitations when applied to hardening low-rigidity parts. The reason is a rather high radial load on the workpiece, which leads to its bending. This load can be reduced by reducing

the value of radial interference; however, it will negatively affect the productivity of hardening treatment.

An analysis of the contact between the working tool and the workpiece (fig. 2) showed that, at a constant value of radial interference (t), a flat tool has the largest contact zone (L), and, consequently, the area of plastic indentation will be the largest. For a working tool of curved geometry, the contact area decreases, increasing the pressure in the contact zone.

PROBLEM STATEMENT

It seems expedient to investigate the stress-strain state in the contact zone of the workpiece and a workpiece-deforming tool in the form of a circular sector using computer simulation and to determine temporary and residual stresses at different radii of such a tool.

FINITE ELEMENT MODELING

Computer modeling based on the finite element method (FEM) has been efficiently used to determine the values of temporary and residual

stresses and to analyze the stress-strain state in the deformation zone during hardening by various SPD methods. In this work, FEM was implemented using ANSYS⁴ [6], a software application broadly used for these purposes.

When simulating hardening and concurrent processes, either static and dynamic analysis is selected, depending on the complexity of movements of both the deforming tool and the workpiece [7]. In this work, static simulation was applied, since the investigated tool – a circular sector with a spherical radius – does not perform complex movements. This approach allows static data on the processes occurring in the simulated system to be obtained [8]. At the same time, time and its division, the method of constructing network models and their parameters are the main factors for obtaining an accurate assessment of the characteristics of the simulated system [9].

To carry out calculations under static loading, a geometric model was built in the form of a cylinder and a circular sector with a spherical radius on the cylindrical surface (fig. 3).

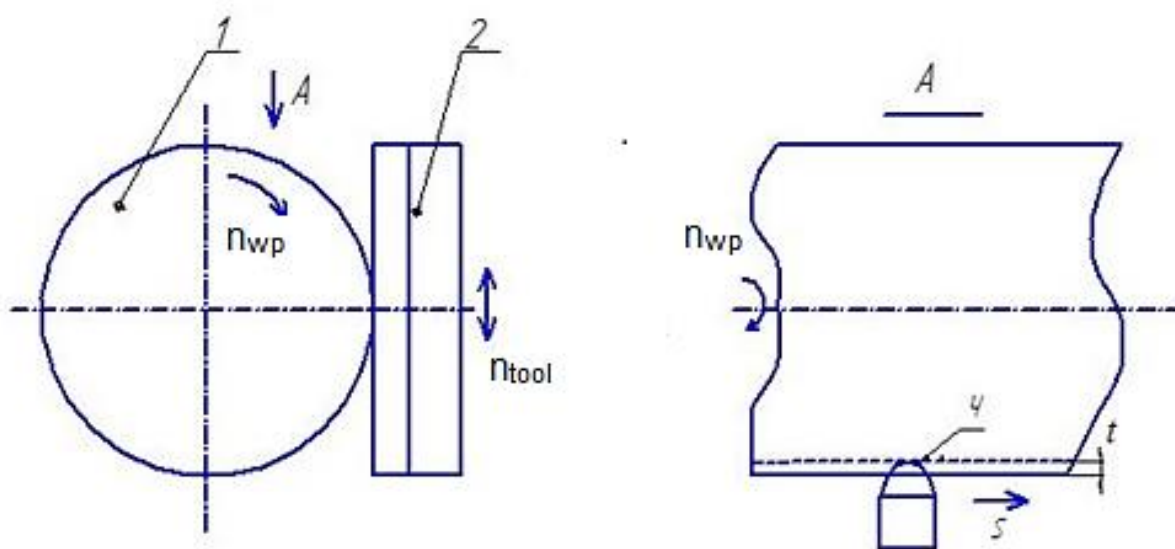


Fig. 1. Oscillatory smoothing diagram [5]: 1 – workpiece; 2 – working tool (n_{wp} – workpiece rotation frequency, rpm; n_{tool} – working tool frequency, double stroke per minute)

Рис. 1. Схема осциллирующего выравнивания [5]: 1 – заготовка; 2 – рабочий инструмент ($n_{заг}$ – частота вращения заготовки, об/мин; $n_{и}$ – частота инструмента, двойные ходы/мин)

⁴ Bakov K. A. ANSYS. User manual. Moscow: DMK Press; 2005, 650 p. / Баков К. А. ANSYS. Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 650 с.

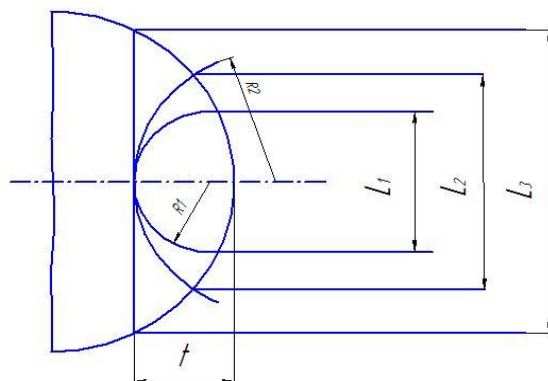


Fig. 2. Diagram of influence of the indenter working part curvature on the contact zone size
 (R1 – indenter with R1 radius, R2 – indenter with R2 radius)

Рис. 2. Схема влияния кривизны рабочей части индентора на размер зоны контакта
 (R1 – индентор с радиусом R1, R2 – индентор с радиусом R2)

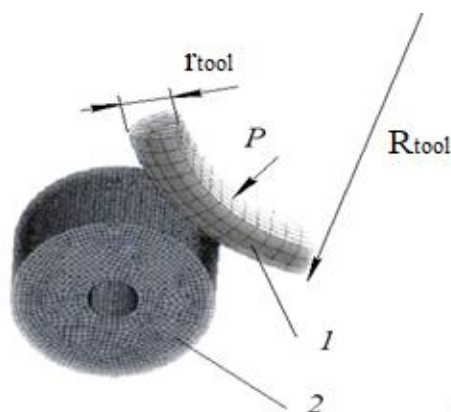


Fig. 3. Finite element model when loading a cylinder with a sectorial tool (P – contact force):

1 – circular sector with a rounding radius r_{tool} ; 2 – cylinder with the diameter D_{wp}

Рис. 3. Конечно-элементная модель при нагружении цилиндра секториальным инструментом
 (P – контактная сила): 1 – круговой сектор с радиусом скругления r_u ; 2 – цилиндр диаметром $D_{заг}$

Main characteristics

Workpiece: a cylinder with a diameter $D_{wp} = 20$ mm; Workpiece material: steel 45 with elastoplastic and strain-hardening characteristics; modulus of elasticity $E = 2 \cdot 10^5$ MPa; Poisson's ratio $\mu = 0.3$; bilinear deformation diagram (yield limit $\sigma_T = 360$ MPa, hardening modulus $E_T = 1.45 \cdot 10^3$ MPa).

Tool: a circular sector with a spherical radius on the cylindrical surface; alloy VK8; modulus of elasticity $E = 6 \cdot 10^5$ MPa; Poisson's ratio

$\mu = 0.3$; coefficient of friction in the contact zone of the working tool with the workpiece $f = 0.1$; tool working radius $r_{tool} = 5$ mm.

To assess the **stress** state at different points of a cylindrical specimen, it is necessary to determine the stress intensity (von Mises) and residual stresses along the axes O_z (axial σ_z^{res}), O_x (radial σ_r^{res}), O_y (tangential σ_ϕ^{oct}). In this case, when using principal stresses, the stress-strain state of the cylinder according to Von Mises is determined by the stress intensity σ_i ⁵ [10–12]:

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

⁵ Bruyaka V. A., Fokin V. G., Kuraeva Ya. V. *Engineering analysis in ANSYS Workbench*. Part 2: learning aid. Samara: Samara Polytech Flagship University; 2013, 149 p. / Бруйка В. А., Фокин В. Г., Кураева Я. В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Ч. 2: учеб. пособ. Самара: Изд-во СамГТУ, 2013. 149 с.

Table 1. Basic simulation modes

Таблица 1. Базовые режимы моделирования

Workpiece rotation frequency n_{wp} , rpm	Tool rotation frequency n_{tool} , rpm	Negative allowance t , mm	Workpiece diameters D_{wp} , mm	Radius of the working sector R_{tool} , mm	Tool working radius r_u , mm
0	0	0,1	20; 40; 60	25; 50; 75; 100; 125; ∞	5

To assess the stress state in the deformation zone and compare the regularity of changes in temporary and residual stresses in the surface layer with an increase in the radius of the working sector, the following basic modes were selected.

SIMULATION RESULTS

The stress state of a material during SPD is differentiated into temporary and residual stresses. Temporary stresses occur under the action of external forces, while residual stresses occur when these forces are absent. Temporary stresses affect the power characteristics of the process, the depth of the hardened layer, the pressure in the deformation zone, as well as the strength and wear resistance of the workpiece-deforming tool. Residual stresses determine the fatigue strength, fracture processes, wear resistance, corrosion and other operational properties of products [13–16].

Fig. 4 shows the distribution fields of temporary and residual stresses in the cross section of a cylinder at the moment of direct external influence (see fig. 4 a) and in its absence (see fig. 4 b). A working tool with a sector radius $R_{tool} = 25$ mm acts on the surface of a workpiece with a diameter $D_{wp} = 20$ mm under loading in basic

modes. Fig. 5 shows the components of temporary and residual stresses along the radius of a workpiece with a diameter $D_{wp} = 20$ mm.

During SPD under the action of a working tool in the form of a circular sector, residual stresses of compression and residual stresses of tension arise in the surface layer and central zone, respectively. The maximum axial and tangential residual compression stresses are formed on the surface of parts [17, 18]. Radial residual stresses on the surface of the workpiece are equal to zero.

Tab. 2 presents the maximum temporary and residual stresses in the workpiece under the action of a deforming tool in the form of a circular sector with different radii.

On the basis of the data in tab. 2 (with the exception of $R_{tool} = \infty$), dependencies were constructed (fig. 6) for the maximum temporary and residual stresses on the sector radius of the deforming tool for workpieces of various diameters.

EFFECT OF THE SECTOR RADIUS OF THE WORKING TOOL (R_{tool})

The radius of the working sector (sector radius of the working tool) is an important element in the mechanics of deformation and structure

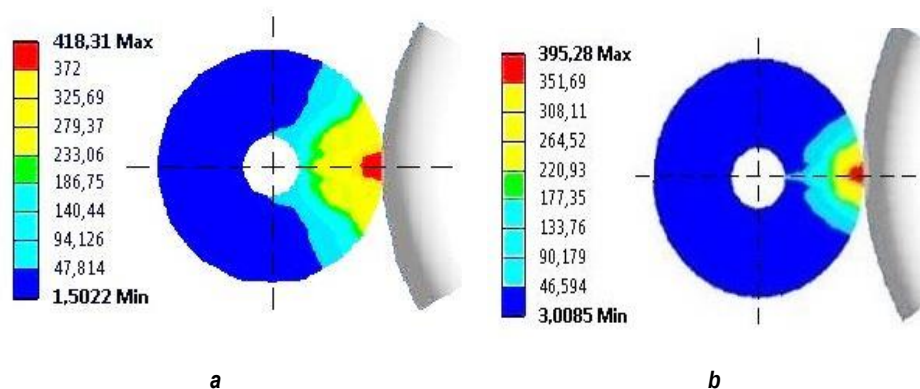


Fig. 4. Distribution zone of intensity of temporary (a) and residual (b) stresses in the cross section of the sample after loading and unloading

Рис. 4. Зона распределения интенсивности временных (a) и остаточных (b) напряжений в поперечном сечении образца после нагружения и разгрузки

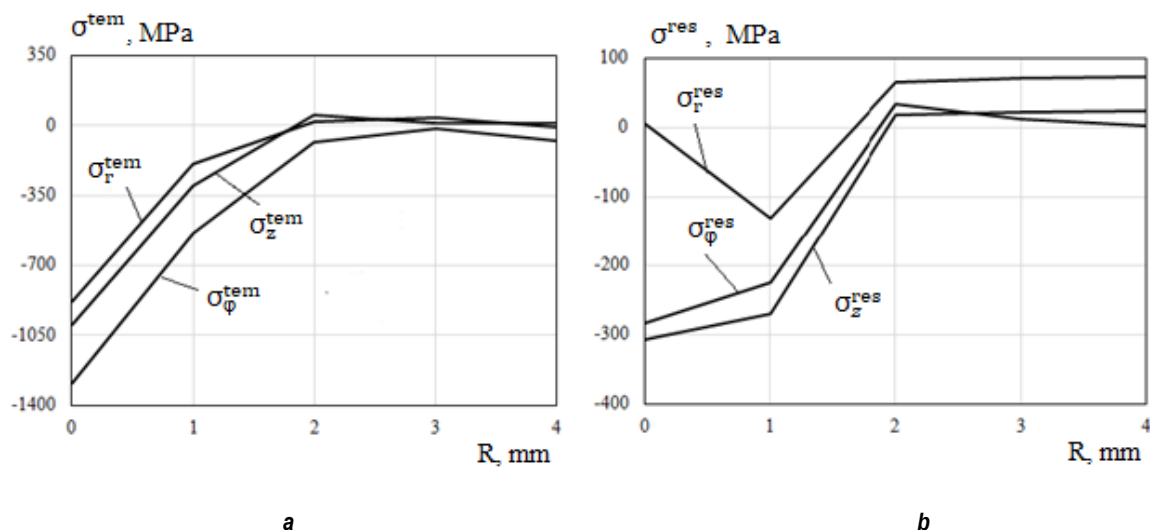


Fig. 5. Distribution of components of temporary (a) and residual (b) stresses along the radius of the sample
Рис. 5. Распределение компонент временных (a) и остаточных (b) напряжений вдоль радиуса образца

Table 2. Values of maximum temporary and residual stresses at different values of the working tool sectorial radius
Таблица 2. Значения максимальных временных и остаточных напряжений при разных значениях секториального радиуса рабочего инструмента

Working sector radius R_{tool} , mm		25	50	75	100	125	∞
Maximum stress values, MPa							
$D_{wp} = 20$ mm	σ_{max}^{tem}	418.31	403.91	382.46	367.81	342.71	285.24
	σ_{max}^{res}	395.28	373.46	363.02	346.96	327.47	266.86
$D_{wp} = 40$ mm	σ_{max}^{tem}	403.45	393.67	373.78	355.32	331.88	264.98
	σ_{max}^{res}	365.22	350.58	342.38	329.76	309.88	228.12
$D_{wp} = 60$ mm	σ_{max}^{tem}	385.43	366.11	356.45	342.99	321.55	233.67
	σ_{max}^{res}	324.11	303.77	288.55	267.06	255.32	199.85

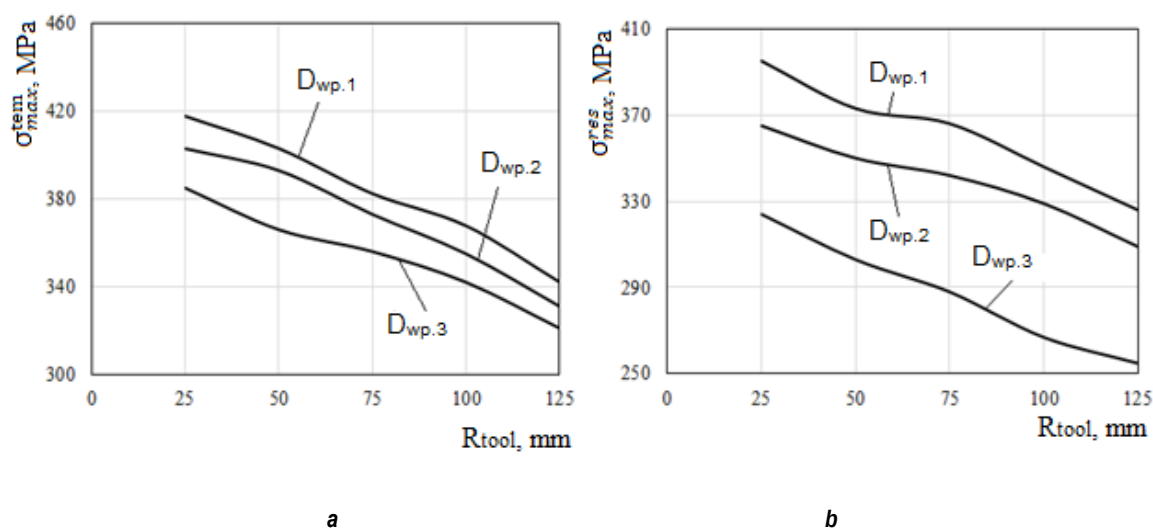


Fig. 6. Influence of the working sector radius on the intensity of maximum temporary (a) and residual (b) stresses: $D_{wp1} = 20$ mm; $D_{wp2} = 40$ mm; $D_{wp3} = 60$ mm

Рис. 6. Влияние радиуса рабочего сектора на интенсивность максимальных временных (a) и остаточных (b) напряжений: $D_{заг.1} = 20$ мм; $D_{заг.2} = 40$ мм; $D_{заг.3} = 60$ мм

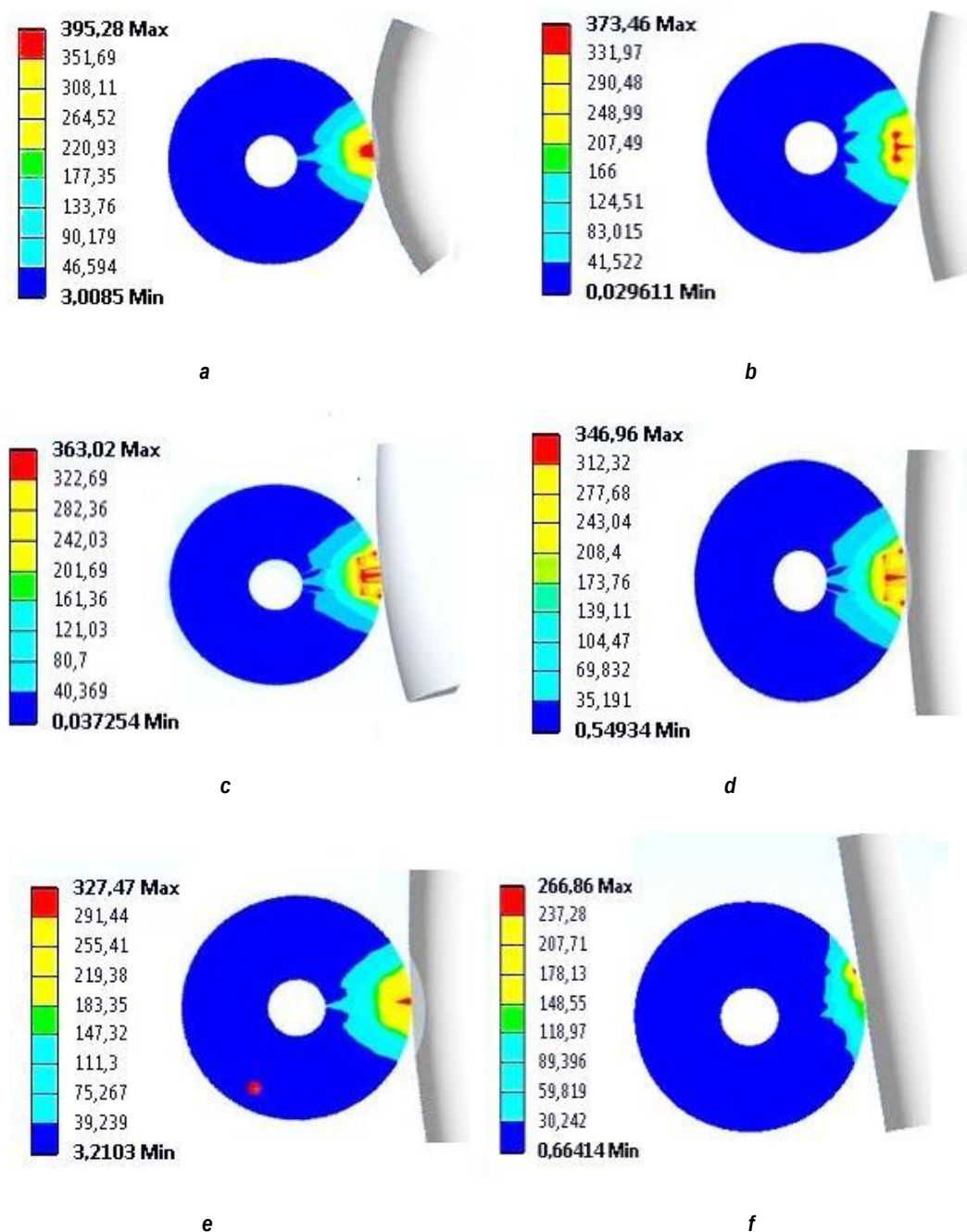


Fig. 7. Distribution fields of maximum residual stress intensity in the cylinder cross section under basic loading conditions:

a – $R_{tool} = 25$ mm; b – $R_{tool} = 50$ mm;

c – $R_{tool} = 75$ mm; d – $R_{tool} = 100$ mm; e – $R_{tool} = 125$ mm; f – $R_{tool} = \infty$

Рис. 7. Поля распределения интенсивности максимальных остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра при базовых режимах нагружения: а – $R_u = 25$ мм; б – $R_u = 50$ мм;

с – $R_u = 75$ мм; д – $R_u = 100$ мм; е – $R_u = 125$ мм; ф – $R_u = \infty$

formation. This radius should be optimal to ensure the intensification of the deformation process. It can be noted that an increase in the radius of the working sector leads to a decrease in the corresponding temporary and residual stresses (see fig. 6). This can be explained by the fact that an increase in the radius of the

working sector leads to an increase in the contact area. As a result, the stresses are reduced at the same interference values t .

Fig. 7 shows the distribution fields of the maximum residual stresses depending on the sector radius. Tab. 3 presents the components of the maximum temporary and

residual stresses for a workpiece with a diameter of $D_{wp} = 20$ mm.

When a flat plate acts as a working tool (see fig. 7 f) on the cylindrical surface of a workpiece, minimal distortion of the microstructure occurs in the contact zone with the formation of the lowest maximum stresses.

With a decrease in the sector radius (see fig. 7 b, c, d, e) of the working tool, residual stresses increase due to a change in the contact area in the deformation zone. As a result of using a working tool with the smallest sectorial radius ($R_{tool} = 25$ mm), the surface layer of the workpiece undergoes significant plastic deformation (see fig. 7 a) with the accumulation of a large number of distortions. The latter has a significant effect on the quality of hardened products. It should be noted that the area, in which severe plastic deformation occurs, is concentrated in the local zone of contact with the deforming tool, thus

leading to an increase in the maximum stresses.

SURFACE LAYER DEFORMATION UNDER LOADING BY A WORKING SECTOR TOOL

When a cylindrical workpiece is loaded with a working sector tool, the as-formed plastic deformation changes the structure and properties of the surface layer. The strain state is assessed by relative deformations ε , which, similar to stresses, are distributed along the three main coordinate axes.

Fig. 8 presents the dependence of relative deformations on the sector radius at a constant penetration depth of the working tool. Obviously, under the same loading, the relative deformation ε is inversely proportional to the sector radius of the working tool. It should be noted that the greatest relative deformations under static loading occur in the circumferential (tangential) direction.

Table 3. Values of the components of maximum temporary and residual stresses at different radii of the working sector (workpiece diameter $D_{wp} = 20$ mm)

Таблица 3. Значения компонент максимальных временных и остаточных напряжений при разных радиусах рабочего сектора (заготовка диаметром $D_{зар} = 20$ мм)

$R_{tool}, \text{ mm}$	Temporary stress component, MPa			Residual stress component, MPa		
	σ_{φ}^{tem}	σ_r^{tem}	σ_z^{tem}	σ_{φ}^{res}	σ_r^{res}	σ_z^{res}
25	-1300.41	-859.69	-914.37	-317.44	-159.44	-328.25
50	-1228.32	-837.65	-870.28	-301.06	-154.58	-319.51
75	-1171.31	-813.93	-846.51	-286.22	-146.06	-301.55
100	-1102.09	-774.51	-825.14	-264.83	-140.95	-288.74
125	-1033.12	-738.31	-807.42	-251.35	-135.32	-261.42
∞	-838.43	-512.45	-754.13	-197.64	-112.432	-183.42

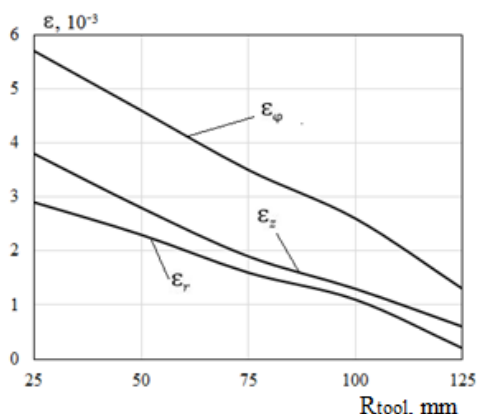


Fig. 8. Influence of the working sector radius on the maximum components of relative deformations under interaction with a cylindrical surface

Рис. 8. Влияние радиуса рабочего сектора на максимальные компоненты относительных деформаций при взаимодействии с цилиндрической поверхностью

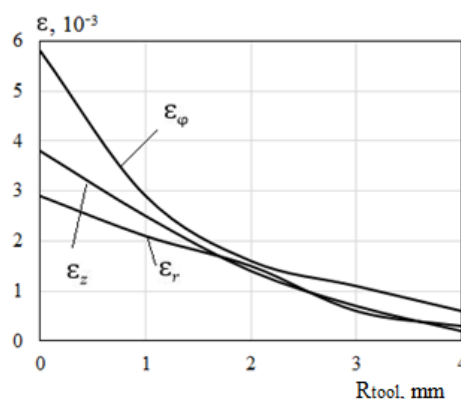


Fig. 9. Distribution of plastic deformations along the depth of a cylindrical sample when loaded with a working sector with the radius $R_{tool} = 25$ mm

Рис. 9. Распределение пластических деформаций по глубине цилиндрического образца при нагружении рабочим сектором радиусом $R_u = 25$ мм

Fig. 9 shows the distribution of three types of deformation in the respective axes along the depth of a cylindrical workpiece under the action of a working sector tool with a radius of $R_{\text{tool}} = 25$ mm. Here, the relative tangential deformation has the maximum value in the contact zone and decreases towards the center of the workpiece. At the same time, the radial and axial deformations are less significant compared to that in the circumferential (tangential) direction.

PLASTIC ZONE DEPTH

Plastic zones formed under the action of the working tool serve as a link between the structure and mechanical properties of the treated material, reflecting the peculiarities of its behavior under specific loading conditions [19]. SPD forms plastic zones differing both in shape and size. This has a significant effect not only on the destruction of metallic materials, but also on their resistance to crack propagation [20, 21]. Information on the effective penetration depth of SPD is used for assessing the physical, mechanical and operational properties of hardened parts. Fig. 10 shows the depth of plastic deformation (h) under the basic modes of exposure. Tab. 4 describes the depth of hardening at different sector radii of the working tool.

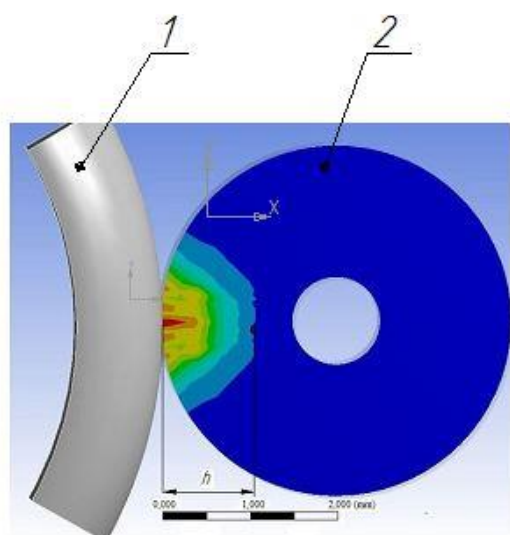


Fig. 10. Distribution fields of plastic deformation in the cross section of the sample at basic loading modes:

1 – working sector; 2 – workpiece

Рис. 10. Поля распределения пластической деформации в поперечном сечении образца при базовых режимах нагружения: 1 – рабочий сектор; 2 – заготовка

Table 4. Influence of the working tool sectorial radius on the depth of the plastic zone and the magnitude of the radial stress in the deformation zone

Таблица 4. Влияние секториального радиуса рабочего инструмента на глубину пластической зоны и величину радиально напряжения в зоне деформации

R_u , mm	σ_r^{tem} , MPa	h , mm
25	-859.69	2.55
50	-837.65	2.25
75	-813.93	1.95
100	-774.51	1.80
25	-738.31	1.65
∞	-512.45	1.05

The obtained simulation results showed that a decrease in the radius of the working sector increases the depth of the hardened layer. It should be noted that the magnitude of the radial stress in the contact zone is the main factor determining the plastic zone depth. Moreover, when using a flat plate ($R_{\text{tool}} = \infty$), the formed depth of plastic zone has the smallest value compared to that obtained with a circular sector.

Our studies showed that the sector radius of the working tool has a significant effect on the stress-strain state of the surface layer of cylindrical workpieces exposed to SPD, in comparison with hardening with a working tool in the form of a flat plate.

Therefore, our data on the stress-strain state of the surface layer of cylindrical workpieces outline promising directions for the application of SPD for improving the quality of hardened parts, consisting in the use of deforming tools differing from those having a rectilinear shape.

CONCLUSION

The data on changes in the values of temporary and residual stresses obtained under basic loading conditions using the ANSYS software have allowed us to draw the following conclusions:

1. Under a constant penetration depth of the working tool, the decrease (from 125 to 25 mm) in the sector radius of the working tool leads to an increase (within 4–7%) of the temporary maximum stresses and their constituent components.

2. Upon elimination of the external action of the working tool, residual stresses are formed,

the value of which increases (within 2–6%) with a decrease in the sector radius of the working tool. There is an optimal sector radius (in this study, $R_{\text{tool}} = 25$ mm), which ensures the formation of the maximum residual stresses that do not exceed the strength limit of the selected material.

3. The inversely proportional dependence of the plastic zone depth on the working sector radius confirms the possibility of a more efficient process of SPD by selecting optimal geometric parameters of the circular sector.

4. An assessment of the stress state of the surface layer under the action of workpiece-deforming tools with a different shape of the working edge was carried out. It was found that, compared to a flat working tool, a decrease in the radius of the working sector from 125 to 25 mm lead to a 1.2–1.5-fold increase in the maximum temporary and residual stresses, and a 1.5–2.4-fold increase in the depth of plastic zone. When using a flat working tool, the maximum temporary and residual stresses are characterized by the smallest values.

References

1. Odintsov L. G. *Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 1987, 328 p. (In Russ.).
2. Zaides S. A., Zabrodin V. A., Muratkin V. G. *Surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2002, 304 p. (In Russ.).
3. Suslov A. G. *Quality of machine part surface layer*. Moscow: Mashinostroenie; 2000, 320 p. (In Russ.).
4. Blyumenshteyn V. Yu., Smelyanskiy V. M. *Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 399 p. (In Russ.).
5. Zaides S. A., Nguen Van Hin', Fam Dak Fyong. *Method of surface plastic deformation*. Patent RF, no. 2657263; 2018. (In Russ.).
6. Bubnov A. S. Technological possibilities of the process of straightening low rigid cylindrical parts by constrained compression. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2006;4:68-75. (In Russ.).
7. Rayhan S. B., Rahman M. M. Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer. *Procedia Structural Integrity*. 2020;28:1892-1900. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>.
8. Ablieieva I., Plyatsuk L., Roi I., Chekh O., Gabbassova S., Zaitseva K., et al. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling. *Journal of Environmental Management*. 2021;287:112347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347>.
9. Bukatiy A. S. Improving the accuracy of manufacturing the engines critical parts by means of static and dynamic modeling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017;16(6):374-377. (In Russ.).
10. Ivanova L. N. Deformation of shafts and supports of cylindrical gearboxes as a factor influencing transmission loading capacity. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2002;11:17-22. (In Russ.).
11. Wu Izhan, Liu Huaiju, Wei Peitang, Lin Qinjie, Zhou Shuangshuang. Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;183:105785. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785>.
12. Li Shen, Kim Do Kyun, Benson S. The influence of residual stress on the ultimate strength of longitudinally compressed stiffened panels // *Ocean Engineering*. 2021;231:108839. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108839>.
13. Polyak M. S. *Hardening technology*. In 2 vol., vol. 2. Moscow: Mashinostroenie; 1995, 688 p. (In Russ.).
14. Zaides S. A., Ngo Cao Cuong. Evaluation of stress state in cramped conditions of local loading. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2016;10:6-9. (In Russ.).
15. Wildemann V. E., Lomakin E. V., Tretyakov M. P. Postcritical deformation of steels in plane stress state. *Mechanics of Solids*. 2014;49(1):18-26. <https://doi.org/10.3103/S0025654414010038>.
16. Smelyanskij V. M. *Mechanics of part hardening by surface plastic deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 2002, 300 p. (In Russ.).
17. Syrigou M., Dow R. S. Strength of steel and aluminium alloy ship plating under combined shear and compression/tension. *Engineering Structures*. 2018;166:128-141.
18. Popov M. E., Aslanyan I. R., Bubnov A. S., Emel'yanov V. N., et al. *Part machining by surface plastic deformation: monograph I* under edition of S. A. Zaides. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, 560 p. (In Russ.).
19. Zhou Changping, Jiang Fengchun, Xu De, Guo Chunhuan, Zhao Chengzhi, Wang Zhenqiang, et al. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;280:116599. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>.
20. Ma Chi, Suslov S., Ye Chang, Dong Yalin. Improving plasticity of metallic glass by electropulsing-assisted surface severe plastic deformation. *Materials & Design*. 2019;165:107581.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107581>.

21. Vulyh N. V., Shchadov I. I. Analysis of the elastic stress-strain state of simulated microroughnesses of hardened surfaces. In: *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov: materialy IV Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Life cycle of structural materials: materials of IV All-Russian scientific and technical conference with international participation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, p. 290-297. (In Russ.).

Список источников

1. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Зайдес С. А., Забродин В. А., Мураткин В. Г. Поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2002. 304 с.
3. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
4. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
5. Пат. № 2657263, Российская Федерация, С1, МПК В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования / С. А. Зайдес, Ван Хинь Нгуен, Дак Фьонг Фам; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». Заявл. 31.05.2017; опублик. 09.06.2018.
6. Бубнов А. С. Технологические возможности процесса правки маложестких цилиндрических деталей стесненным сжатием // Вестник ИГТУ. 2006. № 4. С. 68–75.
7. Rayhan S. B., Rahman M. M. Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer // *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 1892–1900. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>.
8. Ablicieva I., Plyatsuk L., Roi I., Chekh O., Gabbassova S., Zaitseva K., et al. Study of the oil geopermeation patterns: A case study of ANSYS CFX software application for computer modeling // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 287. P. 112347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112347>.
9. Букатый А. С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 16. № 6. С. 374–377.
10. Иванова Л. Н. Деформация валов и опор цилиндрических редукторов как фактор влияния на нагрузочную способность передачи // Вестник машиностроения. 2002. № 11. С. 17–22.
11. Wu Izhan, Liu Huaiju, Wei Peitang, Lin Qinjie, Zhou Shuangshuang. Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 183. P. 105785. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785>.
12. Li Shen, Kim Do Kyun, Benson S. The influence of residual stress on the ultimate strength of longitudinally compressed stiffened panels // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 231. P. 108839. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108839>.
13. Поляк М. С. Технология упрочнения. В 2 т., т. 2. М.: Машиностроение, 1995. 688 с.
14. Зайдес С. А., Нго Као Кыонг. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 10. С. 6–9.
15. Wildemann V. E., Lomakin E. V., Tretyakov M. P. Postcritical deformation of steels in plane stress state // *Mechanics of Solids*. 2014. Vol. 49. Iss. 1. P. 18–26. <https://doi.org/10.3103/S0025654414010038>.
16. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
17. Syrigou M., Dow R. S. Strength of steel and aluminium alloy ship plating under combined shear and compression/tension // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 166. P. 128–141.
18. Попов М. Е., Асланян И. Р., Бубнов А. С., Емельянов В. Н. [и др.]. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография / под ред. С. А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2014. 560 с.
19. Zhou Changping, Jiang Fengchun, Xu De, Guo Chunhuan, Zhao Chengzhi, Wang Zhenqiang, et al. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 280. P. 116599. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>.
20. Ma Chi, Suslov S., Ye Chang, Dong Yalin. Improving plasticity of metallic glass by electropulsing-assisted surface severe plastic deformation // *Materials & Design*. 2019. Vol. 165. P. 107581. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107581>.
21. Вулых Н. В., Щадов И. И. Анализ упругого напряженно-деформированного состояния моделируемых микронеровностей упрочняемых поверхностей // Жизненный цикл конструкционных материалов: матер. IV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2014. С. 290–297.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Semen A. Zaides,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Quan Minh Ho,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Nghia Duc Mai,
Cand. Sci. (Eng.),
Deputy Dean of the Mechanical Engineering Faculty,
Air Force Officer's college,
Nha Trang 10000, Viet Nam

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 01.11.2021; approved after reviewing 06.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зайдес Семен Азикович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры материаловедения, сварочных
и аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Хо Куан Минь,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Май Нгиа Дик,
кандидат технических наук,
заместитель декана факультета машиностроения,
Офицерское училище Военно-Воздушных Сил,
10000, г. Нячанг, Вьетнам

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.11.2021; одобрена после рецензирования 06.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 658.512

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-708-719>

Проектирование технологических операций на основе параметров производственной технологичности конструкции изделия с использованием алгоритма автоматизированного проектирования

Дмитрий Александрович Ишенин^{1✉}, Алексей Сергеевич Говорков²^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия¹ ishenin.dmitriy@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6472-8787>² govorkov_as@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9684-8572>

Резюме. Цель исследования – создание алгоритма для автоматизированного проектирования технологических операций, ориентированного на разработку технологического маршрута механической обработки детали с учетом критериев производственной технологичности, данных предприятия и использованием электронной модели изделия. Была проанализирована структура технологического процесса механической обработки детали с использованием метода «теоретического расчленения». Объектом моделирования явился технологический процесс механической обработки детали «шпангоут». Выявленные формальные параметры легли в основу создания алгоритма автоматизированного проектирования и модели технологического маршрута механической обработки детали, в которых применяются правила продукции, а также аппарат математической логики. В результате проведенных исследований предложена схема подбора технологических операций с учетом параметров технологичности конструкции изделия. Создана концепция алгоритма автоматизированного проектирования технологического процесса изготовления изделий машиностроения с заданным уровнем параметров производственной технологичности и учетом параметров предприятия. Предложен принцип формирования маршрута и выбора технологических операций механической обработки. Выбран ряд критериев производственной технологичности (трудоемкость, материалоемкость, себестоимость изготовления) для оценки технологических операций механической обработки. В результате исследования получен алгоритм автоматизированного проектирования технологических операций с учетом параметров производственной технологичности. Работа алгоритма апробирована на технологическом процессе изготовления детали «шпангоут». Применение разрабатываемого алгоритма позволит предприятиям повысить качество проектируемых технологических процессов производства изделий машиностроения. Кроме того, использование предложенного алгоритма позволит уменьшить трудозатраты и сроки разработки технологического процесса изготовления деталей машиностроения. Формализация процесса проектирования технологического процесса является важным этапом в развитии цифровизации и автоматизации всего производства.

Ключевые слова: проектирование, автоматизация проектирования, технологические операции, технологический процесс механической обработки, технологичность, технологичность конструкции изделия

Для цитирования: Ишенин Д. А., Говорков А. С. Проектирование технологических операций на основе параметров производственной технологичности конструкции изделия с использованием алгоритма автоматизированного проектирования // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 708–719. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-708-719>.

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Engineering working operations based on parameters of product manufacturability using a computer-aided design algorithm

Dmitry A. Ishenin^{1✉}, Alexey S. Govorkov²^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹ ishenin.dmitriy@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6472-8787>² govorkov_as@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-9684-8572>

Abstract: The study aimed to develop an algorithm for computer-aided design (CAD) of working operations. A processing route for machining components was developed based on the criteria of production manufacturability, industrial data and a digital model of the product. The process of machining a workpiece was analysed using a method of theoretical separation. The machining process of a frame workpiece was used as a model. The identified formal parameters formed a basis for developing a CAD algorithm and a model of manufacturing route associated with the mechanical processing of a workpiece applying a condition-action rule, as well as mathematical logic. The research afforded a scheme for selecting process operations, given the manufacturability parameters of a product design. The concept of CAD algorithm was developed to design a production process of engineering products with given manufacturability parameters, including industrial data. The principle of forming a route and selecting a machining process was proposed. Several criteria of production manufacturability (labour intensity, consumption of materials, production costs) were selected to evaluate mechanical processing. A CAD algorithm for designing technological operations considering the parameters of manufacturability was developed. The algorithm was tested by manufacturing a frame workpiece. The developed algorithm can be used for reducing labour costs and development time, at the same time as improving the quality of production processes. The formalisation of process design is a crucial stage in digitalisation and automation of all production processes.

Ключевые слова: проектирование, автоматизация проектирования, технологические операции, технологический процесс механической обработки, технологичность, технологичность конструкции изделия

Keywords: design, design automation, technological operations, machining process, manufacturability, product design manufacturability

For citation: Ishenin D. A., Govorkov A. S. Engineering working operations based on parameters of product manufacturability using a computer-aided design algorithm. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):708-719. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-708-719>.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация и цифровизация производства – это, бесспорно, основные направления технологического развития промышленности. Современное промышленное производство использует цифровые и компьютерные технологии во всех аспектах своей работы. Практически все процессы, от непосредственного контроля и управления технологическим процессом до технологического проектирования, осуществляются в настоящее время с применением цифровых данных и цифровой инфраструктуры. При этом процесс проектирования технологических операций до сих пор является малоформализованным, что приводит к большой трудоемкости проектирования технологического процесса.

Разработка процесса механической обработки детали является очень трудоемкой задачей. Проектирование технологического процесса механической обработки изделия машиностроения, соответствующего параметрам производственной технологичности, осложняется тем, что номенклатура материалов и оборудования постоянно расширяется, а технологии совершенствуются [1].

Основной массив информации в структуре технологического процесса занимают технологические операции.

Проектирование операций механической обработки предполагает выбор оборудова-

ния, конструкции режущих инструментов, оснастки и назначения режимов резания. Совокупность этих параметров определяет, является ли проектируемый технологический процесс технологичным.

Разработка и проектирование технологических операций начинаются с формирования перечня исходных данных. В исходных данных могут быть выделены данные предприятия, нормативные документы, электронная модель изделия и требования к детали. К данным предприятия относятся следующие:

- информация о типе производства на предприятии;
- информация о номенклатуре оборудования и оснастки, используемая на предприятии;
- информация о технологических решениях, принятых на предыдущих этапах разработки изделия.

К технологическим решениям, принятым на предыдущих этапах, относятся метод обработки и вид технологического процесса. Эти параметры зависят от вида и конфигурации изделия, его габаритов, вида принятой заготовки, точности и качества обрабатываемых поверхностей.

При проектировании технологических операций разрабатывают и уточняют их содержание, назначают последовательность переходов. Также при проектировании выби-

раются оборудование и оснастка, назначают режимы механической обработки.

Для окончательного формирования технологической операции необходимо использовать [2, 3]:

- данные о разработанном маршруте технологической обработки, схеме базирования и закрепления;
- сведения о точности и шероховатости поверхностей до и после обработки на данной операции;
- информацию о припусках на обработку;
- данные о такте выпуска или размера партии деталей.

Проектирование технологических операций завершается:

- выбором оборудования и оснастки;
- расчетом припусков;
- расчетом режимов механической обработки.

Одна из основных сложностей проектирования технологических операций для технолога заключается в том, что ему необходимо назначить оснастку и оборудование, номенклатура которых весьма разнообразна. А для решения задачи расчета режимов резания и припусков заготовки технолог может воспользоваться различными методами: табличным (опытно-статическим), аналитическим и графоаналитическим [2].

Постановка проблемы. Таким образом, при проектировании технолог или команда технологов зачастую могут получить несколько вариантов технологического процесса. В таком случае необходимо оценить полученные варианты технологических процессов (ТП) и технологических операций, руководствуясь технико-экономическими принципами проектирования: максимальной экономией времени и требуемой производительностью. Однако окончательный выбор обусловлен только опытом и знаниями технолога. Эта проблема может решиться созданием системы автоматизированного проектирования (САПР) технологических операций, учитывающей параметры производственной технологичности [4–11].

В настоящее время существует множество САПР для проектирования технологиче-

ского процесса изготовления изделий. Однако большинство из них направлены на структуризацию процесса проектирования.

Целью исследования является разработка алгоритма проектирования технологических операций с учетом заданного уровня технологичности на основе производственных данных. Для достижения поставленной цели осуществлялось решение следующих задач: разработка методик автоматизированного проектирования, позволяющих осуществлять проектирование технологического процесса исходя из обеспечения максимальной производственной технологичности; создание алгоритма выбора технологических операций с учетом параметров производственной технологичности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье авторы предлагают сконструированную схему проектирования технологических операций (рис. 1). При разработке данной схемы в первую очередь учитывалась возможность внедрения ее в условиях применения интегрированных САПР с учетом параметров технологичности конструкции изделия [12].

Процесс проектирования, при котором для каждого этапа проектирования технологических операций могут потребоваться определенные и различные наборы исходных данных, начинается с подготовки исходных данных [2]. На схеме процесса проектирования исходные данные сгруппированы по типам:

- данные предприятия;
- нормативная документация;
- электронная модель изделия;
- требования к точности;
- параметры производственной технологичности.

Отдельно стоит отметить такие элементы схемы, как база данных и база знаний. Эти элементы вынесены за блок непосредственно проектирования. База данных является упорядоченным набором структурированной информации и может аккумулировать в себе полностью или частично весь набор исходных данных. База знаний, однако, в отличие

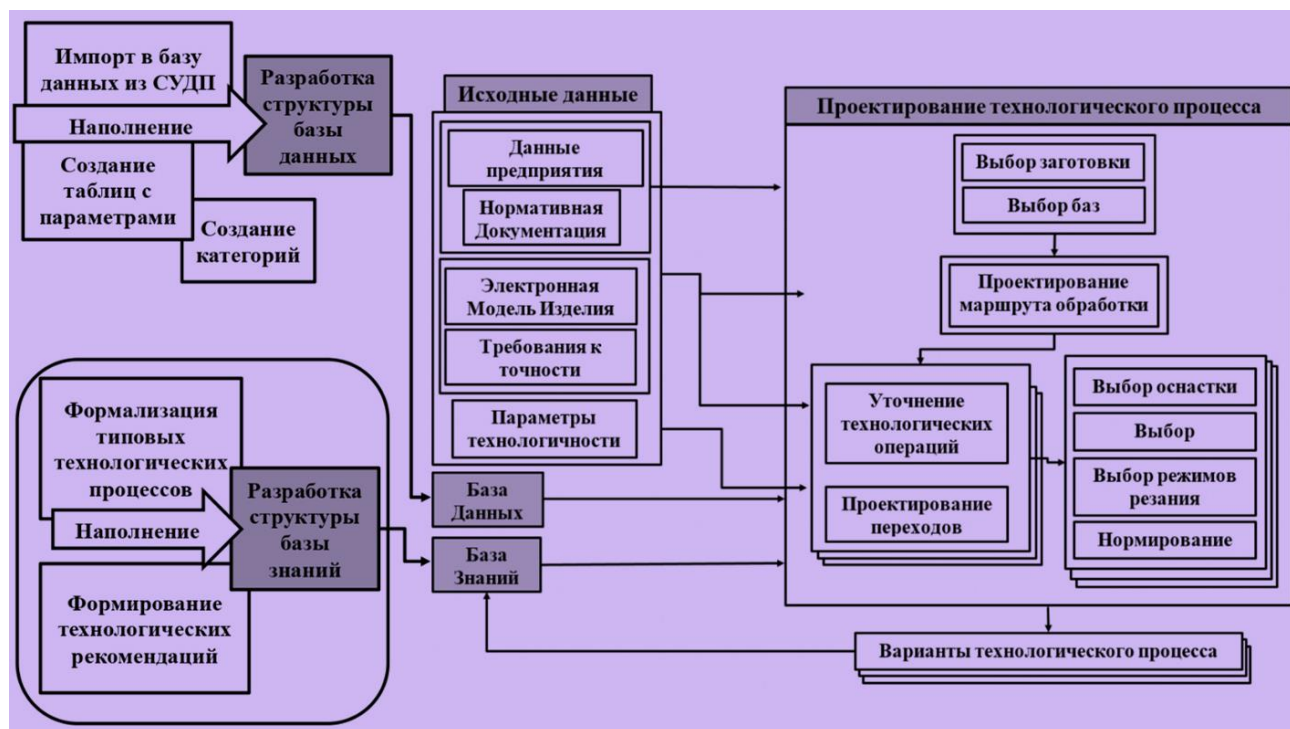


Рис. 1. Схема процесса проектирования технологического процесса с учетом параметров производственной технологичности

Fig. 1. Diagram of the flow process design taking into account production manufacturability parameters

от базы данных содержит в себе правила вывода и информацию об опыте и знаниях технологов [13].

База данных и база знаний должны стать основой алгоритма. При этом разработка базы данных на настоящий момент не является проблемой, так как большинство современных предприятий аналогичные базы данных уже использует. Основной задачей сейчас является разработка специальной базы знаний, для этого необходима формализация типовых технологических процессов и получение рекомендаций экспертов-технологов.

Различные варианты маршрутов технологической обработки изделия проектируются с использованием данных о геометрических параметрах производимой детали и заготовки, порядке выполнения технологических операций и переходов, информации об использовании определенного вида оснастки и инструмента.

В результате процесса проектирования технолог должен найти вариант технологического процесса, который будет являться наиболее технологичным. Для выбора наиболее технологичного варианта нужно

руководствоваться параметрами технологичности конструкции изделия (ТКИ), которая может быть оценена с качественной и количественной сторон.

Качественный метод оценки технологичности основан на практическом опыте и знаниях технологов и реализуется на основании эвристического анализа соответствия конструкции изделий производственной технологичности.

При **количественной** оценке ТКИ используют разнообразные показатели технологичности. Рассматривая производственную технологичность, общепринято пользуются следующими параметрами [14–20]:

- трудоемкость изделия при изготовлении – суммарные затраты труда на выполнение технологического процесса изготовления изделия;
- удельная трудоемкость изделия в изготовлении – отношение трудоемкости изделия в изготовлении к номинальному значению основного параметра;
- технологическая себестоимость изделия в изготовлении – суммарные затраты средств на осуществление технологического

процесса изготовления изделия;

- коэффициент применимости материала – отношение нормы расхода данного материала к сумме норм расхода всех материалов на изготовление изделия.

При разработке методики автоматизированного проектирования технологических операций авторами было проведено разделение используемых при проектировании на группы исходных данных. Затем, опираясь на типовой технологический процесс, из него были выделены значимые для определенного этапа проектирования исходные данные, способ и основание для их выделения. После этого аналогично данная методика была проделана для формализованного процесса (табл. 1).

Первым рассматриваемым этапом проектирования ТП взят «выбор заготовки». Для выбора заготовки основными параметрами являются следующие:

- геометрия, т.е. в данном случае максимальные габаритные размеры детали;
- материал;
- точность изготовления изделия.

Большинство из этих данных присутствует на электронной модели изделия, доступной для получения информации технологом. Выбор заготовки осуществляется технологом на основании базы данных или справочного материала.

Для этапа выбора баз значимым параметром являются геометрия детали и состав ее конструктивных элементов (КЭ), эти же параметры являются основными для формирования маршрута обработки, они тесно взаимосвязаны между собой.

Параметры для проектирования технологических операций целесообразнее всего разделить по типу операции. В большинстве технологических процессов можно выделить три вида операций: контрольная, разметочная и формообразующая.

При проектировании операции формообразования технолог использует геометрические данные и данные о конструктивных элементах детали, данные о материале изделия, информацию о точности изготовления детали.

Эти данные можно получить из электронной модели изделия или чертежа детали, при необходимости дополнив их информацией из нормативной документации и справочников.

При разработке разметочной или контрольной операции технолог должен использовать данные о геометрических параметрах детали и ее конструктивных элементах. Эту информацию технолог аналогично может получить из электронной модели изделия или чертежа.

Теперь рассмотрим представление тех же исходных данных в уже формализованном процессе.

Таблица 1. Представление исходных данных в формализованном процессе проектирования
Table 1. Presentation of input data in a formalized design process

Этап проектирования		Исходные данные (значимый параметр)	Представление в существующем технологическом процессе	Представление в формализованном процессе
Выбор заготовки		геометрия	технолог по модели	модель + БЗ + БД
		материал	атрибут модели	атрибут модели
		точность	НД, модель (чертеж)	БЗ + БД
Выбор баз		геометрия / КЭ	технолог по модели	модель + БЗ + БД
Проектирование маршрута обработки		геометрия / КЭ	технолог по модели	модель + БЗ + БД
Операции	формообразование	геометрия / КЭ	технолог по модели	модель + БЗ + БД
		материал	атрибут модели	атрибут модели
		точность	НД, чертеж	БЗ + БД
	разметочная	геометрия	технолог по модели	модель + БЗ
	контрольная	геометрия / КЭ	технолог по модели	модель + БЗ + БД

Примечание: КЭ – конструктивный элемент; БД – база данных; БЗ – база знаний; НД – нормативная документация.

Геометрические параметры изделия, материал и точность являются основной исходной информацией этапа выбора заготовки. Геометрическая информация в формализованном процессе может быть представлена совокупностью баз знаний и данных, а также электронной моделью изделия.

Геометрическая информация и данные о конструктивных элементах изделия используются для выбора баз и проектирования маршрута механической обработки. На этапе проектирования операций необходимы следующие информационные исходные данные: геометрическая информация, о конструктивных элементах, а также сведения о материале и точности.

Для формализации процесса проектирования и разработки методики автоматизированного проектирования с учетом параметров технологичности в первую очередь необходимо наличие правил базы знаний, т.к. они необходимы для представления исходных данных. Помимо базы знаний, для представления исходных данных необходимы: база данных, электронная модель изделия или чертеж.

При решении вопроса автоматизации проектирования множество частных задач проектирования технологических операций можно разделить на формализуемые и неформализуемые [12]. Ряд задач, которые могут быть отнесены к формализуемым, достаточно короток. Можно выделить следующие задачи:

- расчет припусков и межпереходных размеров;

- расчет режимов резания;

К неформализуемым можно отнести задачи нерасчетного характера:

- разработка маршрута обработки детали;

- структура операции;

- выбор станков, инструментов и т.д.

Однако различные варианты решения данных задач могут быть уточнены на основании параметров производственной технологичности конструкции изделия. Таким образом, в автоматическом режиме ряд заведомо неподходящих вариантов может быть

отменен, затем производится составление другого, наиболее подходящего, ряда. В этих условиях автоматизированное проектирование технологических операций может представлять собой последовательный выбор типовых решений в зависимости от комплекса условий производства, конструкторско-технологических параметров детали и параметров технологичности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим подробно работу предложенного алгоритма автоматизированного проектирования технологических операций (рис. 2). Работа алгоритма рассматривалась на примере проектирования ТП для детали «шпангоут» (рис. 3). Данная деталь является цельнофрезерованной и относится к ребрам жесткости.

Подготовка исходных данных. Процесс разработки технологических операций начинается с формирования исходных данных. При проектировании технологической операции и в целом технологического процесса требуются разные и определенные наборы исходной информации. Часть информации для проектирования берется из базы данных, а часть, допустим, из информации о геометрических параметрах, из электронного макета изделия.

Выбор заготовки. Для этого этапа технологу необходимы данные о геометрии детали, получаемые с ЭМИ. Метод получения заготовки и ее материал должны назначаться при помощи правил специальной базы знаний. По завершении данного этапа технологу должны быть предложены различные варианты вида заготовки, представленные как $Z(m, GI, s)$, где m – материал заготовки; GI – геометрические данные; s – способ изготовления.

В данном случае «шпангоут» является исключительно ответственной деталью летательного аппарата, вид ее заготовки оговорен в конструкторской документации и не может быть изменен.

Выбор технологических баз. При выборе баз технолог использует данные о геометрии и конструктивных элементах детали.

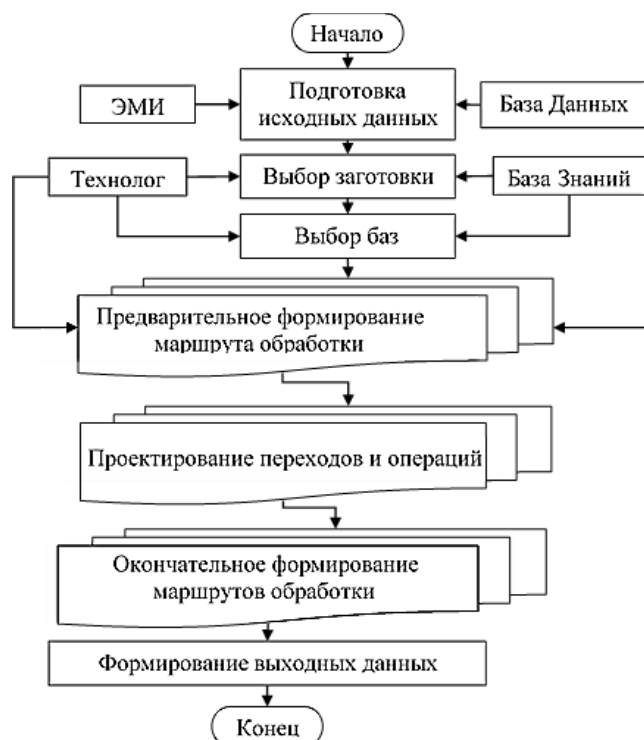


Рис. 2. Общая схема алгоритма проектирования технологического процесса
Fig. 2. General diagram of the flow process design algorithm

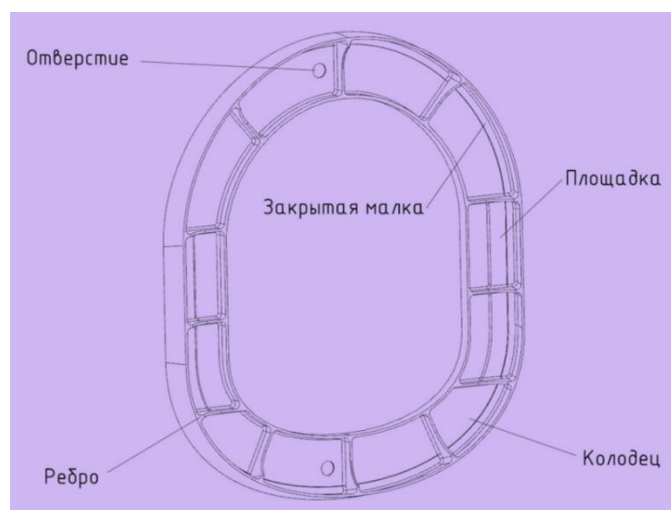


Рис. 3. Шпангоут
Fig. 2. Frame

Эти исходные данные технолог получает с ЭМИ. Выбор технологических баз производится с использованием правил базы специальных знаний.

У детали «шпангоут» базой назначается задняя стенка – поверхность с отсутствием информации.

Предварительное формирование маршрута обработки. В неформализованном процессе проектирования задача фор-

мирования маршрута механической обработки полностью зависит от технолога. В работе технолог может обращаться к различным справочникам и нормативной документации.

Однако формализованный алгоритм, рассматриваемый в данной статье, использует для формирования маршрута обработки специальную базу знаний. Таким образом, на этапе проектирования технолог должен, используя базу знаний, сформировать после-

довательность технических операций таким образом, чтобы получился полный процесс формирования готового изделия. База знаний должна сформировать несколько вариантов маршрутов механической обработки, руководствуясь критериями производственной технологичности из которых технолог выберет удовлетворяющий его вариант. На данном этапе технологические операции не формируются окончательно, а только определяется их вид.

На этом этапе требуются данные о геометрических параметрах детали и конструктивных элементах изделия.

Маршрут технологической обработки можно представить как упорядоченную последовательность операций:

$$M(O_1, O_2, \dots O_i),$$

где O_i – технологическая операция.

Каждая операция должна переводить заготовку из «состояния n » в «состояние $n+1$ » (рис. 4).

Реальный маршрут технологической обработки детали «шпангоут» выглядит так:

$$M(O_{п1}, O_{м1}, O_{п2}, O_{к1}, O_{ф1}, O_{ф2}, \text{ и т.д.}),$$

где $O_{п}$ – подготовительная операция; $O_{м}$ – маркирование; $O_{к}$ – контрольная операция; $O_{ф}$ – операция формообразования.

Проектирование переходов и операций. Проектирование операций осуществляется с использованием базы знаний на основании маршрута механической обработки, полученного на предыдущем этапе.

Для формирования технологической операции используются информация о геометрических параметрах детали, данные о конструктивных элементах изделия, материале заготовки и точности изготовления.

Технологическая операция может быть представлена как

$$O(v, n, t),$$

где v – вид операции; n – состояние изделия;

t_0 – основное время обработки резанием.

Однако точнее будет представить операцию как последовательность переходов:

$$O(P_1, P_2, \dots P_n),$$

а переход как

$$P(v, t_0),$$

где v – вид операции; t_0 – основное время обработки резанием.

Текущей вид заготовки на каждом этапе маршрута обработки описывает параметр состояния изделия. Каждое состояние заготовки характеризуется рядом параметров (геометрических и технологических).

Назначение операции осуществляется с учетом критерия наименьшей трудоемкости.

На этом этапе производится подбор оборудования, исходя из составленного ранее маршрута технологической обработки, подбор осуществляется из базы данных оборудования с использованием правил базы знаний.

Окончательное формирование маршрутов обработки. После всех проведенных операций система может сформировать несколько вариантов маршрутов технологической обработки. Главным критерием подбора являются параметры технологичности. Основной задачей этого этапа является оптимизация маршрута технологической обработки путем поиска кратчайших маршрутов с последующим выбором наименее трудоемких.

Исходными данными для этого этапа служат сведения, полученные на предыдущих этапах работы.

Формирование выходных данных – это завершающий этап технологического проектирования, здесь технолог получит несколько вариантов технологического процесса, из которых ему потребуется выбрать наиболее приемлемый для применения на производстве. Варианты ТП ранжированы по критерию наименьшей трудоемкости. Схема работы предложенного алгоритма представлена на рис. 5.

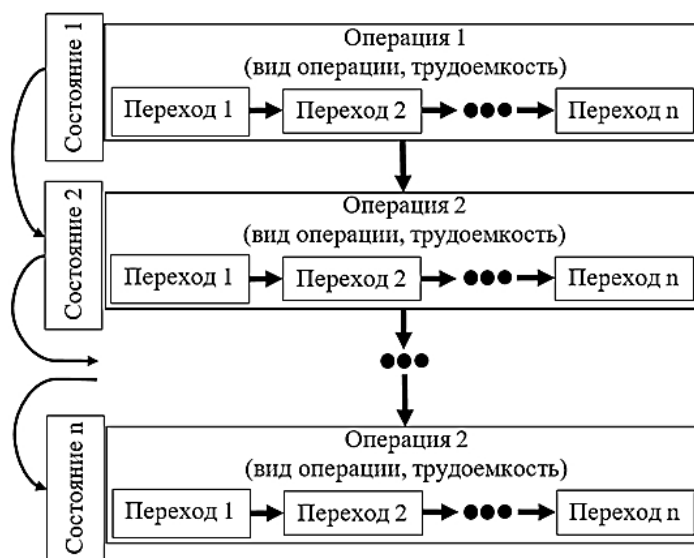


Рис. 4. Маршрут технологической обработки
Fig. 4. Processing route

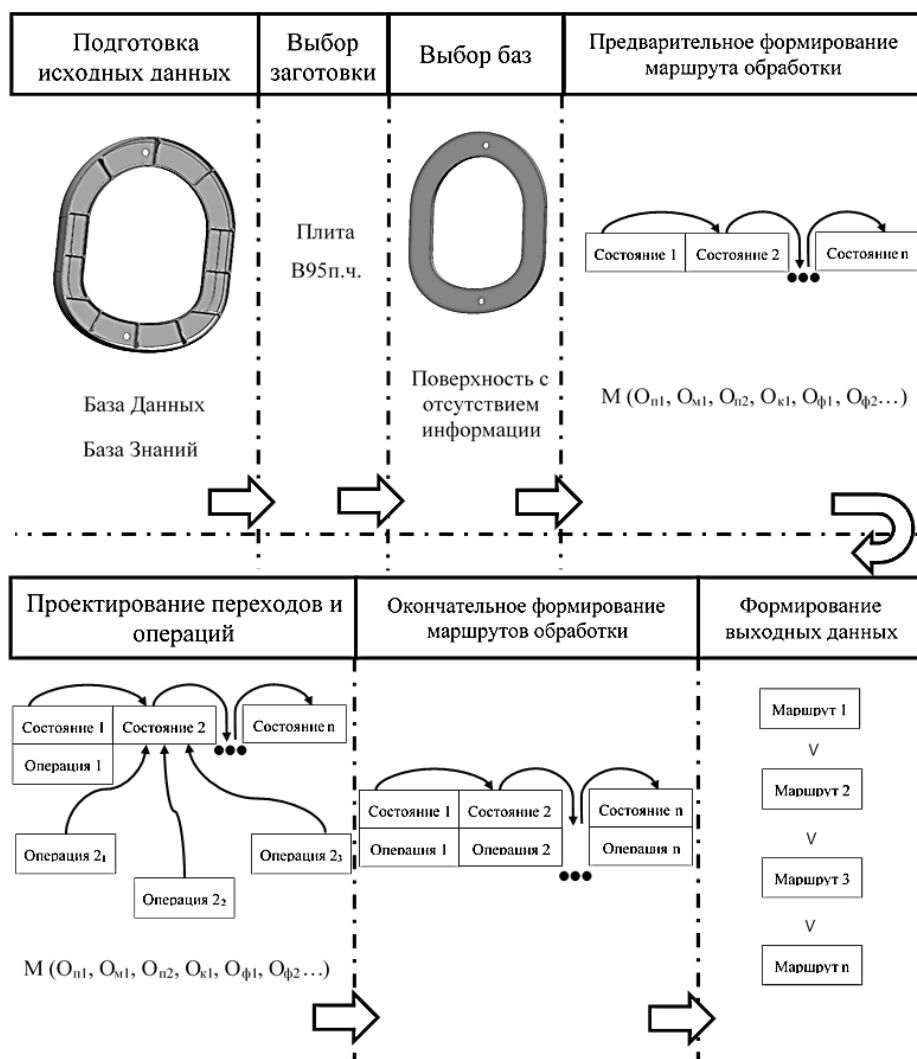


Рис. 5. Схема работы алгоритма проектирования на примере детали «шпангоут»
Fig. 5. Diagram of design algorithm operation on example of the Frame part

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Указанный выше подход к проектированию технологического процесса позволит:

- повысить качество проектируемого технологического процесса за счет формализации процесса проектирования, и как следствие уменьшения количества ошибок, допускаемых технологами;
- уменьшить трудозатраты и сроки разработки технологического процесса изготовления деталей машиностроения.

Как считают авторы, применение данного алгоритма автоматизированного проектирования технологических операций с использованием параметров производственной тех-

нологичности должно позволить повысить качество выпускаемой продукции и уменьшить трудоемкость технологической подготовки производства предприятиям машиностроительной отрасли. Это особенно актуально в современных условиях производства, так как предприятия существуют в мире жесткой конкуренции. Необходимо отметить, что ориентированная на конкурентов среда требует от машиностроения обеспечения технологической гибкости машиностроительных производств, которую способны обеспечить только автоматизация и цифровизация производства.

Список источников

1. Бочкарев П. Ю., Шалунов В. В., Бокова Л. Г. Проектирование технологических операций механообработки в системе планирования технологических процессов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 3. № 1. С. 46–54.
2. Говорков А. С., Чьен Ха Ван. Разработка автоматизированной системы проектирования технологических процессов изготовления изделия машиностроения на основе трехмерной модели // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4. С. 48–55.
3. Фокин И. В., Божеева Т. В. Автоматизация процедуры принятия решений при разработке технологических процессов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1. С. 67–72.
4. Govorkov A. S., Fokin I. V., Lavrentyeva M. V., Karlina Yu. I. Methodology of the formalized approach of the automated construction of the manufacturing route of a mechanical engineering product // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 632. P. 012093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012093>.
5. Баранова Е. М., Баранов А. Н. Разработка процедуры контроля качества изделий на базе современного подхода к проектированию технологических операций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 10. С. 76–86.
6. Подрез Н. В., Токарев Д., Жилиев А., Фокин И. Система разработки технологических процессов изготовления деталей и сборочных единиц АТ на основе существующих взаимосвязей с учетом 3-х мерной модели // Наука будущего – наука молодых: сб. тез. III Всерос. науч. форума (г. Нижний Новгород, 12–14 сентября 2017 г.). Нижний Новгород: Изд-во ООО «Инконсалт К», 2017. С. 319–320.
7. Тимирязев В. А., Белянкина О. В., Серебряков А. А. Автоматизированное проектирование технологических процессов с использованием ЭВМ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 10. С. 220–222.
8. Кузнецов П. Н., Брижанский Л. В., Кузнецова А. П. Повышение надежности техники путем автоматизированного проектирования деталей и узлов // Наука и Образование. 2019. Т. 2. № 4. С. 264.
9. Sokolnikov R. A., Bozheeva T. V., Govorkov A. S. Development of methodology for formalized selection of technological operations when designing technological process manufacturing of machinery // Journal of Physics Conference Series. 2020. Vol. 1582. No. 1. P. 012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1582/1/012080>.
10. Камшилов С. Г. Системы автоматизированного проектирования в производственных процессах // Вестник Челябинского государственного университета. 2004. Т. 7. № 1. С. 104–108.
11. Ишенин Д. А. Возможности для автоматизирования выбора технологических операций с учетом производственной технологичности конструкции изделия // Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика: сборник статей по матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 14 января 2020 г.). Уфа: Изд-во НИЦ «Вестник науки», 2020. С. 79–83.
12. Подрез Н. В. Обзор математических методов представления технологических процессов // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. статей Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 11 ноября 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 32–36.
13. Кузнецов В. А., Владыка А. А., Цитриков А. В., Захарова О. О. Проектирование технологического процесса изготовления деталей на основе технико-экономического моделирования // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». 2012. Т. 2. № 2. С. 112–116.
14. Непомилуев В. В., Соколова Е. Ю. Методология выбора оптимального варианта технологического решения по комплексному критерию // Машиностроение – основа технологического развития России: сб. науч. ст. V Международной науч.-техн. конф. (г. Курск, 22–24 мая 2013 г.). Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2013. С. 257–261.
15. Ирзаев Г. Х. Экспертные методы управления тех-

нологичностью промышленных изделий. М.: Изд-во «Инфра-Инженерия», 2010. 192 с.

16. Бокова Л. Г., Королев Р. Д., Бочкарев П. Ю. Совершенствование оценки производственной технологичности изделий специального машиностроения // Высокие технологии в машиностроении: матер. XVI Всерос. науч.-техн. конф. (г. Самара, 25–28 октября 2017 г.). Самара: Изд-во СамГТУ, 2017. С. 9–10.

17. Леонович Д. С., Журавлёв Д. А., Карлина Ю. И. Современные тенденции развития инженерного анализа изделий с деталями из композиционных материалов на примере принципов работы ANATOLEFLEX // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 11. С. 56–62. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-56-62>

18. Ларченко А. Г. Оценка качества изделий из поли-

мерных материалов машиностроительного назначения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 3. С. 463–471. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-463-471>.

19. Рычков Д. А., Лобанов Д. В., Смирнова Д. А. Методика оптимизации режимов резания в интеллектуальной системе проектирования технологических процессов // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 4. С. 18–24.

20. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В., Митин Э. В., Сульдин С. П., Тюрбева Т. Б. Проектирование структуры технологических процессов на основе синтеза // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 1. С. 77–84. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084>.

References

1. Bochkaryov P. Yu., Shalunov V. V., Bokova L. G. Machining technological operations designing within the system of technological operations planning. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Vestnik Saratov State Technical University*. 2009;3(1):46–54. (In Russ.)

2. Govorkov A. S., Chien Ha Van. Development of the automated system of design engineering products manufacturing technological process based on three-dimensional model. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* = *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015;4:48–55. (In Russ.)

3. Fokin I. V., Bozheeva T. V. Automation of the decision-making procedure in the development of technological processes. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* = *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2017;1:67–72. (In Russ.)

4. Govorkov A. S., Fokin I. V., Lavrentyeva M. V., Karlina Yu. I. Methodology of the formalized approach of the automated construction of the manufacturing route of a mechanical engineering product. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632:012093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012093>.

5. Baranova E. M., Baranov A. N. Develop procedures for quality control of products on the basis of contemporary approach to design technological operations. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. = *Proceedings of the Tula State University*. 2017;10:76–86. (In Russ.)

6. Podrez N. V., Tokarev D., Zhilyaev A., Fokin I. Development system of technological processes for manufacturing of aircraft parts and assembly units based on existing relationships taking into account the 3-dimensional model. In: *Nauka budushchego – nauka molodyh: sbornik tezisev III Vserossiyskogo nauchnogo foruma* = *Science of the future – science of the young: collected abstracts of III All-Russian scientific forum*. 12–14 September 2017, Nizhnij Novgorod. Nizhnij Novgorod: OOO "Inkonsalt K"; 2017, p. 319–320. (In Russ.)

7. Timiryazev V. A., Belyankina O. V., Serebryakov A. A. The automated designing of technological processes with

computers. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'* = *Mining informational and analytical bulletin*. 2009;10:220–222. (In Russ.)

8. Kuznetsov P. N., Brizhanskij L. V., Kuznetsova A. P. Improving equipment reliability by computer-aided design of parts and assemblies. *Nauka i obrazovanie*. 2019;2(4)264. (In Russ.)

9. Sokolnikov R. A., Bozheeva T. V., Govorkov A. S. Development of methodology for formalized selection of technological operations when designing technological process manufacturing of machinery. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1582(1):012080. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1582/1/012080>.

10. Kamshilov S. G. Computer-aided design systems in production processes. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2004;7(1):104–108. (In Russ.)

11. Ishenin D. A. Automation potential of selection of technological operations taking into account the production manufacturability of product design. In: *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. Innovatika: sbornik statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = *Actual Problems of Science and Technology. Innovation. Collected articles of the materials of the International Scientific Conference*. 14 January 2020, Ufa. Ufa: NIC "Vestnik nauki"; 2020, p. 79–83. (In Russ.)

12. Podrez N. V. Review of mathematical methods for representing technological processes. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sbornik statej Vserossiyskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = *Aircraft engineering and transport of Siberia: collected articles of All-Russian youth. Scientific and practical conference*. 11 November 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, p. 32–36. (In Russ.)

13. Kuznetsov V. A., Vlyadka A. A., Citrikov A. V., Zakharova O. O. Design of the technological process of manufacturing parts based on technical and economic modeling. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI»* = *Scientific journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2012;2(2):112–116. (In Russ.)

14. Nepomiluev V. V., Sokolova E. Yu. Selection procedure of the optimal option for a technological solution ac-

cording to a complex criterion. *Mashinostroenie – osnova tekhnologicheskogo razvitiya Rossii: sbornik nauchnyh statej V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Mechanical engineering as the basis of technological development in Russia: collected articles of V international scientific and technical conference*. 22–24 May 2013, Kursk. Kursk: The Southwest State University; 2013, p. 257–261. (In Russ.)

15. Irzaev G. H. *Expert methods of managing processability of industrial products*. Moscow: "Infra-Inzheneriya"; 2010, 192 p. (In Russ.)

16. Bokova L. G., Korolev R. D., Bochkarev P. Yu. Improving assessment of industrial processability of special mechanical engineering products. *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy XVI Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = High technologies in mechanical engineering: materials of XVI All-Russian scientific and technical conference*. 25–28 October 2017, Samara. Samara: Samara Polytech Flagship University; 2017, p. 9-10. (In Russ.)

17. Leonovich D. S., Zhuravlev D. A., Karlina Yu. I. Modern development tendencies in engineering analysis of

products with composite material parts on example of ANATOLEFLEX operating principles. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):56-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-56-62>

18. Larchenko A. G. Quality assessment of products from polymeric materials designed for engineering purposes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):463-471. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-463-471>

19. Rychkov D. A., Lobanov D. V., Smirnova D. A. Methodology of optimization of cutting regimes in intelligent system of designing technological processes. *Sovremennye materialy, tehnika i tekhnologii*. 2018;4:18-24. (In Russ.)

20. Kalyakulin S. Yu., Kuzmin V. V., Mitin E. V., Suldin S. P., Tyurbееva T. B. Designing the structure of technological processes based on synthesis. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018;28(1):77-84. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201801.077-084>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ишенин Дмитрий Александрович,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Говорков Алексей Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент,
директор института информационных технологий и
анализа данных,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 09.11.2021; принята к публикации 27.12.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Ishenin,

Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Alexey S. Govorkov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Director of the Institute of Information Technologies and
Data Analysis,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 09.11.2021; accepted for publication 27.12.2021.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 629.113

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-720-732>

Исследование сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска с определением взаимосвязи аэродинамических и теплообменных характеристик воздушного потока

Павел Александрович Поляков^{1✉}¹Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия¹polyakov.pavel88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0576-5398>

Резюме. Цель – определение взаимосвязи аэродинамических и теплообменных характеристик воздушного потока в сегментарном вентиляционном аппарате тормозного диска с улучшением рассеивания тепла в пограничном слое омывающего воздушного потока. В исследованиях использовались классические уравнения тепло-массообмена в пограничном слое воздушного потока омываемого вентиляционного аппарата тормозного диска. Для оценки работы данного аппарата применялся метод подобия. Объектом исследований явился сегментарный вентиляционный аппарат тормозного диска. Для подтверждения теоретических изысканий выполнялось CFD-моделирование объекта исследований. Разработаны математические модели вентиляционных аппаратов тормозных дисков со сплошным каналом и каналом со щелями. В качестве критерия оценки эффективности работы вентиляционного аппарата тормозного диска был предложен параметр турбулизации воздушного потока внутри исследуемого аппарата. Полученные аналитические зависимости показали, что с увеличением скорости воздушного потока в 20 раз значение данного параметра снизилось в 1,24 раза. С увеличением температурного перепада в пограничном слое в 8 раз параметр турбулизации увеличился в 86,2 раза. На основании предложенного критерия оценки эффективности работы был проведен расчет аэродинамических и теплообменных характеристик объекта исследований. По результатам расчета предложена взаимосвязь конструктивных параметров сегментарного вентиляционного аппарата с улучшением рассеивания тепла в пограничном слое омывающего воздушного потока. Проведенное CFD-моделирование подтвердило теоретические исследования аэродинамических характеристик сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска. Данную математическую модель совместно с параметром турбулизации возможно применять при проектировании современных вентилируемых тормозных дисков и для оценки существующих узлов охлаждения фрикционных узлов. Это необходимо для минимизации возникновения ситуации снижения теплообменных процессов.

Ключевые слова: тормозной диск, вентиляционный аппарат, пограничный слой, критерий Рейнольдса, критерий Стэнтона, параметр турбулизации

Для цитирования: Поляков П. А. Исследование сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска с определением взаимосвязи аэродинамических и теплообменных характеристик воздушного потока // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 720–732. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-720-732>.

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Study of a segmented ventilation system of the brake disc and determination of the aerodynamic and heatexchange characteristics of the airflow

Pavel A. Polyakov^{1✉}¹Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia¹polyakov.pavel88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0576-5398>

Annotation. This study aims to determine a relationship between the aerodynamic and heat exchange characteristics of the air flow in a segmented ventilation system of the brake disc with improved heat dissipation in the boundary layer of the air flow. Classical equations of heat and mass transfer in the boundary layer of the air flow cooling the brake disc ventilation chamber were used. The cooling performance of the system was assessed using the method of similarity. The obtained theoretical findings were confirmed by CFD-modelling. Mathematical models were developed for vented discs with both continuous grooves and slotted grooves. A criterion for assessing the performance of brake disc ventilation systems was proposed, consisting in turbulization of the air flow inside the device under study. According to the obtained analytical dependencies, a 20-fold acceleration of the air flow decreases the turbulization parameter by 1.24 times. An increase in the temperature difference in the boundary layer by 8 times leads to an increase in the turbulization parameter by 86.2 times. Using the criterion proposed for assessing the work performance, the aerodynamic and heat exchange characteristics of the system under study were calculated. As a result, a relationship between the design parameters of the segmented ventilation system and improved heat dissipation in the boundary layer of the cooling air flow is proposed. The conducted CFD modelling confirmed the aerodynamic characteristics of the system under study obtained theoretically. This mathematical model together with the turbulization parameter can be used when both developing modern vented brake discs and assessing the existing cooling systems of friction units in order to minimize the possibility of reduced heat exchange processes.

Keywords: brake disc, ventilation unit, boundary layer, Reynolds criterion, Stanton criterion, turbulence parameter

For citation: Polyakov P. A. Study of a segmented ventilation system of the brake disc and determination of the aerodynamic and heat exchange characteristics of the airflow. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):720-732. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-720-732>.

ВВЕДЕНИЕ

Применение вентилируемых тормозных дисков на различных видах транспорта приводит к снижению тепловой нагруженности всего тормозного механизма в целом. Разнообразие конфигураций узлов охлаждения подтверждается многими патентами как отечественных, так и зарубежных ученых.

Алгоритмы расчета вентилируемых тормозных дисков не нашли своего отражения ни в различных нормативных документах, регламентирующих фрикционные узлы, ни в научных исследованиях. В работах присутствуют отдельно рассматриваемые параметры влияния узла охлаждения тормозного диска на единичный эксплуатационный показатель. Наибольшее внимание исследователей тормозных механизмов привлекают температурные поля рабочих поверхностей тормозного диска и аэродинамические характеристики оребренного узла охлаждения. Современные методики расчета вентилируемых тормозных дисков не находят ответа на вопрос взаимосвязи аэродинамических характеристик потока и теплообменных параметров узла охлаждения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Необходимо исследовать взаимосвязь аэродинамических и теплообменных характе-

ристических воздушного потока в сегментарном вентиляционном аппарате тормозного диска с улучшением рассеивания тепла в пограничном слое омывающего воздушного потока.

В целом узлы охлаждения тормозного диска можно разделить на оребренные и сегментарные (рис. 1 а, б).

В работе [1] был представлен анализ термомеханического поведения сухого трения между тормозным диском и фрикционными накладками во время процесса торможения. Результаты анализа показали, что поле температуры и поле напряжения в процессе фазы торможения были полностью сопряжены. Температура напряжения Фона Мизеса – суммарные деформации тормозного диска увеличиваются по мере роста контактного давления контактных поверхностей. Цель исследования [2] состояла в том, чтобы определить влияние аэродинамических характеристик воздушного потока, омывающего поверхности вентилируемого тормозного диска с улучшением рассеивания тепла. Поля воздушного потока на выходе из четырех различных геометрий тормозных дисков, вращающихся в свободном воздушном потоке, были измерены с помощью датчика давления с пятью отверстиями. Датчики давления использовались для определения средних и нестационарных характеристик воздушного потока на выходе тормозных дисков.



Рис. 1. Вентилируемые тормозные диски с оребренным (а) и сегментарным (b) узлами охлаждения
Fig. 1. Ventilated brake discs with finned (a) and segmental (b) cooling units

Авторами в рамках проекта [3] было осуществлено экспериментальное исследование с целью параметрического анализа оребренного вентиляционного аппарата. Это исследование было направлено на анализ поведения воздушного потока (т.е. разделения потока и развитие вторичного воздушного потока) в вентиляционном аппарате, зависящем от количества ребер и скоростей вращения. Увеличение числа ребер для заданной частоты вращения приводит к одновременному увеличению массового расхода прокачиваемого воздуха.

Статья [4] посвящена анализу влияния геометрических параметров на конструктивные характеристики вентилируемого тормозного диска. Для улучшения конструктивных характеристик вентилируемых тормозных дисков была применена методология многоцелевой оптимизации с использованием поверхности отклика. Были разработаны регрессионные модели второго порядка, коррелирующие геометрические параметры с максимальной деформацией и эквивалентным напряжением. На деформацию и эквивалентное напряжение влиял внешний периферийный радиус фланца, в то время как радиус патрубка оказывал значительное влияние на деформацию, но не на эквивалентное напряжение. Целью исследования [5] является повышение теплопередачи вентилируемых тормозных дисков с помощью модифицированных ребер. Исследуемый сценарий торможения представляет собой замедление торможения во время спуска с

горы. Представлена простая модель для вычисления температуры ребра в установившемся состоянии. Коэффициент теплопередачи вентиляции тормозного диска оценивается с помощью проверенного CFD-вычисления (от англ. Computational Fluid Dynamics). Предложена новая конструкция ребра с использованием профиля для повышения эффективности откачки воздуха, повышающего скорость потока между ребрами. В исследовании [6] предложена методика расчета эффективного радиуса трения в тормозе дисково-колодочного типа для железнодорожного транспорта.

Разработанная методика учитывает механизм образования тормозного момента на рабочих поверхностях тормозного механизма и закон изменения коэффициента трения. Радиус трения определяется из значений тормозного момента путем деления его на результирующую силу трения фрикционных накладок, которая определяется суммированием элементарных сил трения исходя из закона распределения контактного давления по площади контактных поверхностей механизма. В исследовании [7] предложена модель оптимизации вентиляционного тормозного механизма легкового автомобиля. Обычно скорости конвективного теплообмена оцениваются с помощью эмпирических корреляций с использованием геометрии тормозных дисков (включая геометрию ребер для вентилируемых дисков) и угловой скорости вращения. Экспериментальные корреляции для прогнозирования скорости воздушно-

го потока и теплопередачи не являются четко обоснованными с теоретической точки зрения. Для начала была подготовлена теоретическая база гидродинамики и определены репрезентативные безразмерные параметры процесса охлаждения дисковых тормозов.

Авторы исследования [8] получили аналитические выражения коэффициента теплопередачи и контактных температур для двух скользящих полупространств с учетом адгезионно-деформационного тепловыделения и контактного теплообмена. Предполагалось, что скорость деформационного тепловыделения экспоненциально снижается с ростом расстояния от границы раздела. Конфигурация тепловыделения и интенсивность контактного теплообмена влияют на распределение тепла только в пределах переходного интервала. Проанализированы особенности идеального теплового контакта, подразумевающего под собой изменение распределения тепла во времени. Авторы исследования [9] задались целью спрогнозировать возникновение неустойчивости скольжения при трении тела системы с одной степенью свободы относительно устойчивого положения равновесия скольжения. Уравнение движения сформулировано с учетом коэффициента трения, зависящего от скорости скольжения, и изменения температуры контакта из-за переходной теплопроводности в теле. Аналитическое выражение для движения тела получено с использованием интегрального преобразования Лапласа. Показано, что неустойчивость скольжения может проявляться в виде отклонения тела от положения равновесия или в виде колебаний. В статье [10] исследуется тип неустойчивости, обусловленный температурной зависимостью коэффициента трения, отличающийся от эластодинамического и термоупругого. Возмущения, возникающие в температурном поле поверхности во время фрикционного контакта, могут расти или затухать. Сформулирован критерий стабильности и проведено исследование тормозного диска на примере простой модели без учета влияния трансформирующего слоя и изменения химических/физических свойств с температурой. Исследователи предложили метод повышения

воспроизводимости выходных данных многофакторного испытания путем разделения диска на несколько секторов с пониженной теплопроводностью между секторами. Авторы [11] предложили связь между демпфированием, зависящим от материала, и динамической неустойчивостью дисковых тормозных механизмов, приводящей к визгу тормозов.

Экспериментальный анализ с помощью функции частотной характеристики показывает различное демпфирование режимов коалесценции тормозной системы, что указывает на возможную неустойчивость, вызванную диссипацией. Сложная система, включающая демпфирование, зависящее от материала, определена в коммерческом программном обеспечении конечных элементов. Модель, подтвержденная экспериментальными данными на стенде для испытания тормозных дисков, используется для расчета влияния изменений демпфирования колодки и диска на стабильность системы с использованием комплексного анализа собственных значений. В статье [12] рассматривается величина аэродинамических потерь, которые могут быть вызваны тормозными дисками железнодорожного транспорта. Была проведена оценка аэродинамического сопротивления различных конструкций вентилируемых дисков, а также сплошного диска. Путем анализа описанных данных измерений и моделирования получены зависимости аэродинамических потерь от скорости вращения и линейной скорости подвижного состава для различных конструкций дисков, а именно – для радиальных и криволинейных каналов.

Согласно проведенному анализу литературных источников, можно сделать вывод, что основное внимание уделяется сплошным тормозным дискам или тормозным дискам с оребренным вентиляционным аппаратом. Сегментарный вентиляционный аппарат тормозных дисков является неисследованной частью, хотя он активно применяется на современных видах автомобильного и железнодорожного транспорта. В различных исследованиях [13–17] приводится описание пограничного слоя в жидкостях и газах при различных режимах течения в смежных отрядах научного знания. Данный эффект ока-

зывает влияние не только на теплоперенос от нагретых поверхностей к свободному воздушному потоку, но и на диффузию внутри потока. Исследование этого эффекта в контексте вентиляционного аппарата могло бы уточнить существующие математические и тепловые модели теплообмена в узлах охлаждения тормозных дисков.

Для разработки математической модели, описывающей аэродинамические и теплообменные процессы, в сегментарном вентиляционном аппарате тормозного диска необходимо представить его в качестве вентиляционного канала с наличием щелей в стенках. Через равный шаг в канале находятся щели с одинаковой шириной (рис. 2 а). Вне зависимости от типа вентиляционного аппарата тормозного диска, на поверхности ребер или сегментов будет образовываться пограничный слой омывающего воздушного потока. Он выполняет функцию теплоизоляционного слоя, стремящегося замедлить теплоотдачу от нагретых поверхностей вентиляционного аппарата тормозного диска. В качестве аналога сегментарному вентиляционному аппарату разработаем оребренный узел охлаждения тормозного диска (рис. 2 б). Габариты

оребренного и сегментарного вентиляционных аппаратов совпадают. На оребренном узле охлаждения также присутствует тепловой пограничный слой. На рис. 2 а показан участок $l_{щ}$, который обозначает величину щели в канале вентиляционного аппарата. В качестве исходных данных математической модели сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска необходимо задать данные воздушного потока, а именно – скорость и температуру свободного воздушного потока u_{∞} , T_{∞} и температуру на поверхности сегмента вентиляционного аппарата T_c . Нужно уточнить тот факт, что при протекании воздушного потока вдоль щели по вентиляционному каналу происходит потеря тепловой энергии, которая может быть обозначена тепловым потоком $q_{щ}$. Для определения направления теплового потока необходимо задаться условием, что воздушный поток, протекающий через щель, будет обладать температурой $T_{щ}$. Помимо исходных данных, необходимо внести следующие допущения: температура поверхности ребра вентиляционного канала будет постоянной по всей его длине l ; радиационным теплообменом от нагретых поверхностей можно пренебречь.

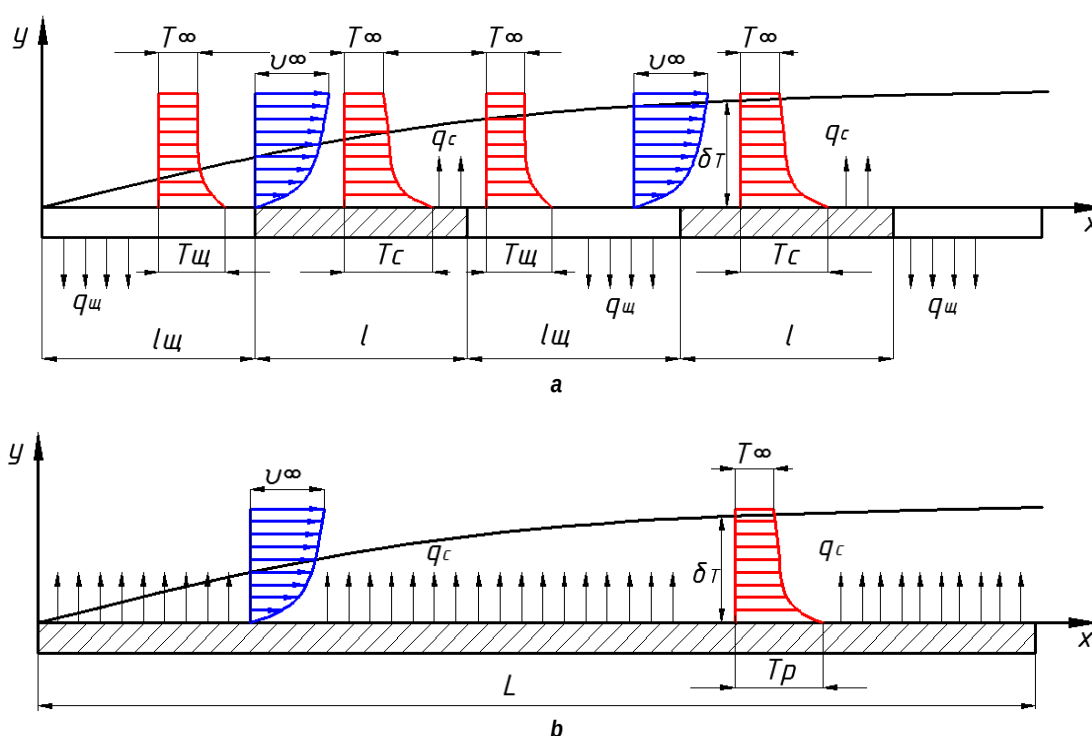


Рис. 2. Расчетная схема сегментарного (а) и оребренного (б) вентиляционных аппаратов тормозных дисков

Fig. 2. Design diagram of segmental (a) and finned (b) ventilation devices of brake discs

Запишем уравнение энергии турбулентного пограничного слоя воздушного потока [18]:

$$\frac{d Re_\vartheta}{dl} + \frac{Re_\vartheta}{\vartheta} \frac{dT}{dl} = Re_\vartheta St, \quad (1)$$

где Re_ϑ – критерий Рейнольдса для теплового пограничного слоя; ϑ – изменение температуры в пограничном слое воздушного потока, К; T – температура пограничного слоя воздушного потока, К; St – критерий Стэнтона.

Если рассматривать условие, при котором $l_1 \approx l$, то произведение критерия Рейнольдса и изменения температуры будут идентичны в воздушном потоке вдоль щели и вдоль ребра вентиляционного канала:

$$Re_\vartheta \vartheta = Re_{\vartheta_{щ}} \vartheta_{щ}, \quad (2)$$

где $Re_{\vartheta_{щ}}$ – критерий Рейнольдса для теплового пограничного слоя воздушного потока, протекающего вдоль щели вентиляционного канала; $\vartheta_{щ}$ – изменение температуры в пограничном слое воздушного потока, протекающего вдоль щели вентиляционного канала, К.

Для сравнения аэродинамических параметров воздушного потока в тепловом пограничном слое необходимо ввести параметр турбулизации воздушного потока (Π_T), определяемый из отношения:

$$\Pi_T = \frac{Re_{\vartheta_{щ}}}{Re_\vartheta}. \quad (3)$$

Если рассматривать условия, при которых количество щелей в вентиляционном канале m и ширина ребра канала будут больше ширины щели $l > l_{щ}$, то критерий Рейнольдса для теплового пограничного слоя станет определяться из следующей зависимости:

$$Re_\vartheta = \left[\left(Re_{\vartheta_{щ}} \right)^{m+1} + \frac{m+1}{2} Re_L \int_{l_1}^l v_n dl \right]^{\frac{1}{(m+1)}}, \quad (4)$$

где Re_L – критерий Рейнольдса для сплошного вентиляционного канала оребренного узла охлаждения длиной L при условии:

$$L = \sum_{i=1}^n (l + l_1), i = 1, 2 \dots n,$$

u_n – скорость воздушного потока в пограничном слое вентиляционного канала, м/с.

Для решения уравнения (4) необходимо задаться граничными условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \text{при } y=0, q_c = \max;$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \text{при } y=\delta_T, q_c = 0.$$

где δ_T – толщина теплового пограничного слоя, м.

Внутри толщины теплового пограничного слоя может произойти выравнивание температуры только при условии турбулентного перемешивания и попадания слоев свободного воздушного потока к нагретой поверхности. Максимальное значение $\frac{\partial v_n}{\partial y}$ будет у по-

верхности вентиляционного канала: $y = 0$. Если будет выполняться условие $l \rightarrow \infty$, то наступит снижение теплообменных процессов в пограничном слое вентиляционного канала тормозного диска $T \rightarrow T_c \rightarrow T_\infty$.

Толщина потери энергии воздушного потока в тепловом пограничном слое будет равна:

$$\delta_T = \int_0^\infty \frac{v_n}{v_\infty} \left(1 - \frac{(T - T_c)}{(T_\infty - T_c)} \right) dy. \quad (5)$$

При снижении теплообменных процессов в пограничном слое вентиляционного канала толщина потери энергии будет вычисляться из отношения скоростей:

$$\delta_{TT} \rightarrow \int_0^\infty \frac{v_n}{v_\infty} dy. \quad (6)$$

Введем коэффициент, оценивающий снижение теплообменных процессов в пограничном слое воздушного потока:

$$\beta_T = \frac{\delta_{TT}}{\delta_T}. \quad (6)$$

Граничные условия для наступления момента снижения теплообменных процессов будут следующими: $l \rightarrow \infty$; $\beta_T = 1$, тогда как $l \approx l_1$; $\beta_T \rightarrow \max$.

Учитывая уравнения (4) и (6), параметр турбулизации воздушного потока при условии $\beta_T \rightarrow \max$ будет определяться по формуле:

$$\Pi_T = \left[1 + \frac{m+1}{2} \left(\frac{\beta_{T\max}}{\text{Re}_{\text{эц}}} \right)^{m+1} \int_{l_1}^l \text{Re}_L dl \right]^{\frac{-1}{(m+1)}}. \quad (7)$$

Зададимся в качестве исходных параметров количеством щелей между сегментами вентиляционного канала ($m = 5$).

Введем вместо интеграла $\int_{l_1}^l \text{Re}_L dl$ критерий Рейнольдса, зависящий от длины сегмента Re_l , а при условии, когда $\text{Re}_l = \text{const}$, параметр турбулизации воздушного потока в пограничном слое будет определяться по формулам:

– для ламинарного течения

$$\Pi_T = \left[1 + \frac{5,28}{(\text{Re}_{\text{эц}})^6} \psi \text{Re}_l \right]^{-0,2}; \quad (8)$$

– для турбулентного течения

$$\Pi_T = \left[1 + \frac{0,76}{(\text{Re}_{\text{эц}})^6} \psi \text{Re}_l \right]^{-0,2}, \quad (9)$$

где ψ – отношение коэффициента аэродинамического сопротивления на трение в сплошном вентиляционном канале к коэффициенту аэродинамического сопротивления на трение в вентиляционном канале со щелями.

Согласно исследованиям [19], скорость в пограничном слое воздушного потока в направлении длины канала будет изменяться

по степенному закону: $v_n = l^a$. Допуская, что Re_L , как и в случае с Re_l , может быть постоянной по всей длине радиального вентиляционного канала, проинтегрируем подынтегральное выражение зависимости (7) и получим:

$$\text{Re}_l = \psi \text{Re}_L \frac{l^{a+1} - 1}{(a+1)}, \quad (10)$$

где a – значение степени закона изменения скорости воздушного потока по длине вентиляционного канала.

Подставляя выражение (10) в параметры турбулизации для различных режимов течения воздушного потока (8) и (9), получим:

– для ламинарного течения

$$\Pi_T = \left[1 + \frac{5,28}{(\text{Re}_{\text{эц}})^6} \psi \text{Re}_L \frac{(l^{a+1} - 1)}{(a+1)} \right]^{-0,2}; \quad (8)$$

– для турбулентного течения

$$\Pi_T = \left[1 + \frac{0,76}{(\text{Re}_{\text{эц}})^6} \psi \text{Re}_L \frac{(l^{a+1} - 1)}{(a+1)} \right]^{-0,2}. \quad (9)$$

Помимо расчета аэродинамических параметров, в вентиляционном канале со щелями необходимо учитывать направление тепловых потоков. Допустим, что в щель вентиляционного канала поступает воздушный поток массовой скоростью $j_{\text{щ}}$ и температурой $T_{\text{щ}}$. На рис. 3 представлена схема расчетной модели вентиляционного канала со щелью длиной $l_{\text{щ}}$.

Запишем интегральное соотношение энергии для пограничного слоя воздушного потока в вентиляционном канале со щелями:

$$\frac{\text{Re}_{\text{эц}}}{\text{Re}_l} = St, \quad (10)$$

где St – критерий Стэнтона.

Критерий Стэнтона будет определяться по формуле:

$$St = \frac{j_{\text{щ}}(T_c - T_{\text{щ}})}{\rho_{\infty} v_n (T_c - T_{\infty})} = \frac{j_{\text{щ}} \theta_{\text{щ}}}{\rho_{\infty} v_n}, \quad (11)$$

где $\theta_{\text{щ}}$ – температурный перепад в пограничном слое воздушного потока в вентиляционном канале со щелями.

Подставим выражение (11) в зависимости (8) и (9) и получим следующие зависимости:
– для ламинарного течения

$$\Pi_T = \left[1 + \frac{5,28 \psi v_n^6 \rho_{\infty}^6}{\text{Re}_L^5 j_{\text{щ}}^6 \theta_{\text{щ}}^6} \left(\frac{a+1}{l^{a+1}-1} \right)^5 \right]^{-0,2}; \quad (12)$$

– для турбулентного течения

$$\Pi_T = \left[1 + \frac{0,76 \psi v_n^6 \rho_{\infty}^6}{\text{Re}_L^5 j_{\text{щ}}^6 \theta_{\text{щ}}^6} \left(\frac{a+1}{l^{a+1}-1} \right)^5 \right]^{-0,2}. \quad (13)$$

Для определения характера изменения параметра турбулизации от двух факторов влияния построим две кривые:

$$\Pi_T = f(v_n, \theta_{\text{щ}} = \text{const}),$$

$$\Pi_T = f(\theta_{\text{щ}}, v_n = \text{const})$$

для ламинарного и турбулентного течений воздушного потока (рис. 4 а, б). Исходные данные для двух расчетов были идентичны.

При подстановке одинаковых значений для двух вариантов (рис. 4 а, б), входящих в зависимости (12) и (13), при постоянстве скорости воздушного потока в пограничном слое ($v_n = \text{const}$) при изменении перепада температур в восемь раз параметр турбулизации увеличился в среднем в 86,2 раза. Тогда как при постоянном перепаде температур ($\theta_{\text{щ}} = \text{const}$) с увеличением скорости в 20 раз параметр турбулизации снизился в среднем 1,24 раза.

С увеличением скорости воздушного потока увеличивается толщина теплового пограничного слоя, в результате чего параметр турбулизации будет снижаться. Если скорость воздушного потока будет снижаться, то толщина пограничного слоя, соответственно, уменьшаться, что приведет к росту параметра турбулизации в пограничном слое.

С увеличением температурного перепада в пограничном слое параметр турбулизации будет увеличиваться.

Для подтверждения теоретических исследований произведем CFD-моделирование вентиляционного аппарата тормозного диска. Для разработки CFD-модели тормозного диска прототипа воспользуемся данными исследования [20], посвященного моделированию аэродинамического сопротивления в сегментарном вентиляционном аппарате тормозного диска.

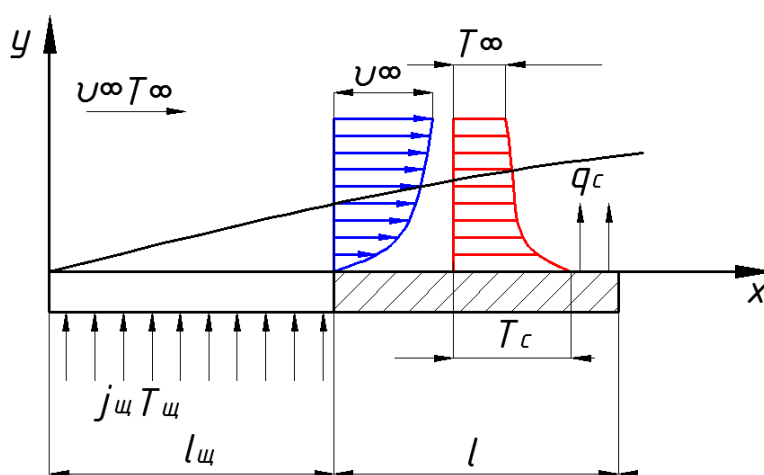


Рис. 3. Расчетная схема расчета параметров воздушного потока с поступлением дополнительного воздушного потока через щель сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска

Fig. 3. Design diagram for calculating air flow parameters with the arrival of additional air flow through the slot of the segmental ventilation device of the brake disc

Для начала разрабатывалась CAD-модель – модель автоматизированного проектирования (от англ. Computer-aided design) тормозного диска с сегментарным вентиляционным аппаратом (рис. 5 а, b).

При помощи программного обеспечения Ansys Fluent была построена полигональная сетка. Количество элементов сетки составило 11263524. Данное количество элементов необходимо для повышения точности расчетов аэродинамических параметров вентиля-

ционного аппарата тормозного диска. Дальнейшим шагом выставлялись направления входного воздушного потока в вентиляционный аппарат тормозного диска. Тормозному диску придавалось вращение с частотой вращения 350 об/мин. Результатами этого исследования являются изменение скорости воздушного потока внутри сегментарного вентиляционного аппарата (рис. 6) и параметр турбулизации (рис. 7).

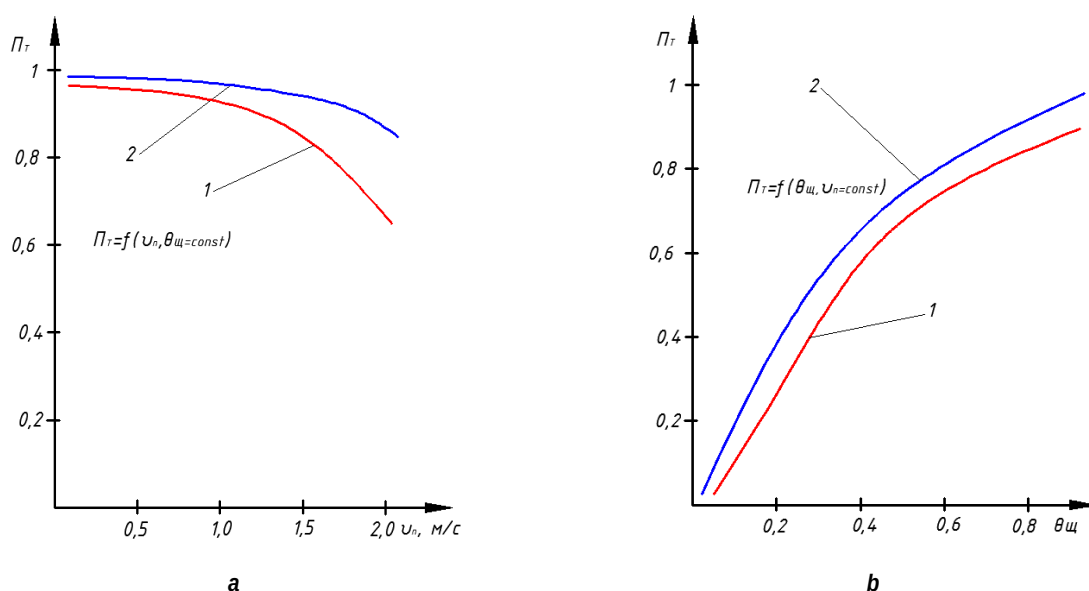


Рис. 4. Изменения параметра турбулизации от двух факторов влияния (1 – для ламинарного течения воздушного потока, 2 – для турбулентного течения воздушного потока):

$$a - \Pi_T = f(v_n, \theta_{ш} = \text{const}); b - \Pi_T = f(\theta_{ш}, v_n = \text{const})$$

Fig. 4. Variations of the turbulence parameter depending on two factors of influence

(1 – for laminar air flow, 2 – for turbulent air flow) $\Pi_T = f(v_n, \theta_{ш} = \text{const})$; $\Pi_T = f(\theta_{ш}, v_n = \text{const})$



Рис. 5. Модель автоматизированного проектирования тормозного диска с сегментарным вентиляционным блоком: а – без надреза; б – с надрезом

Fig. 5. Computer-aided design model of a brake disc with the segmental ventilation unit: a – without a notch; b – with a notch

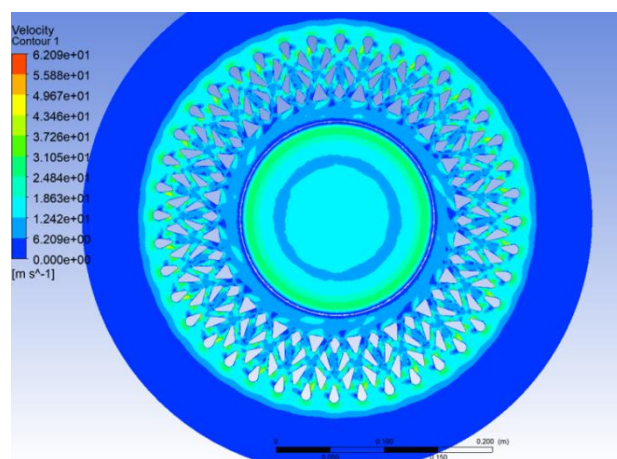


Рис. 6. Изменение скорости воздушного потока внутри сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска
Fig. 6. Variation of air flow velocity inside the segmental ventilation unit of the brake disc

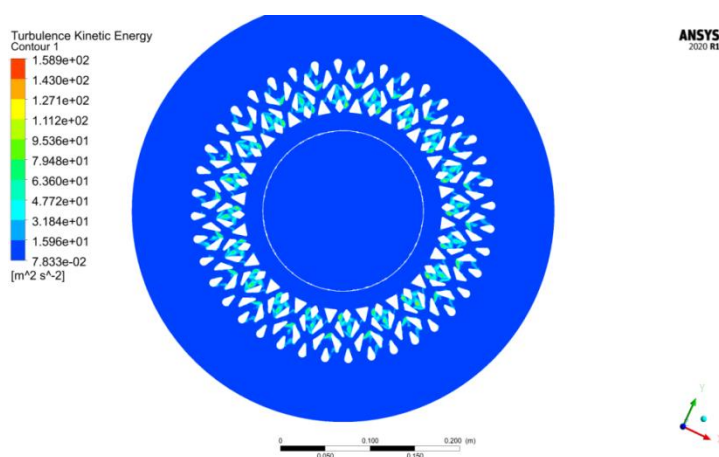


Рис. 7. Изменение параметра турбулизации воздушного потока внутри сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска
Fig. 7. Variation of the parameter of air flow turbulence inside the segmental ventilation unit of the brake disc

Как видно из рис. 6, между сегментами вентиляционного аппарата имеются области снижения скорости воздушного потока. Наибольшая сосредоточенность этих областей расположена ближе к ступице тормозного диска, а на периферии вентиляционного аппарата зоны между сегментами имеют однородную скорость воздушного потока. Также на периферии имеются зоны повышения скорости воздушного потока, расположенные в начале заключительных сегментов вентиляционного аппарата тормозного диска. Это объясняется тем, что при вращении тормозного диска создается разрежение вокруг периферии вентиляционного аппарата тормозного диска. На рис. 7 представлено изменение параметра турбулизации. Согласно наличию областей снижения скоростей воз-

душного потока, на рис. 7 возникает турбулизация воздушного потока. Исходя из проведенного CFD-моделирования, зона с повышенной турбулизацией воздушного потока улучшает теплообмен от нагретых поверхностей тормозного диска вследствие снижения теплового пограничного слоя возле сегментов вентиляционного аппарата тормозного диска. Таким образом, риск снижения теплообменных процессов от поверхностей вентиляционного аппарата будет минимизирован. При этом расположенная у периферии тормозного диска зона вентиляционного аппарата наиболее подвержена снижению теплообменных процессов в связи с ростом теплового пограничного слоя у поверхностей вентиляционного аппарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве критерия оценки эффективности работы сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска был предложен параметр турбулизации воздушного потока. На основании этого критерия был проведен расчет аэродинамических и теплообменных характеристик сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска. В рамках расчета предложена взаимосвязь конструктивных параметров сегментарного вентиляционного аппарата со снижением теплообменных процессов в пограничном слое омывающего воз-

душного потока нагреваемых поверхностей. Проведенное CFD-моделирование подтвердило теоретические исследования аэродинамических характеристик сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска. Данную математическую модель, совместно с параметром турбулизации возможно применять при проектировании современных вентилируемых тормозных дисков, а также при оценке существующих узлов охлаждения – фрикционных узлов – с целью минимизации возникновения ситуации снижения теплообменных процессов.

Список источников

1. Bhure S. Analysis of ventilated disc brake rotor using CFD to improve its thermal performance // 6th International set Conference Vellore (Tamil Nadu, Vellore, January 2013 – May 2013). Vellore: School of mechanical building and science, VIT University, 2013.
2. Pan Like, Han J., Li Z., Yang Z., Li W. Numerical simulation for train brake disc ventilation // Journal of Beijing Jiaotong University. 2015. Vol. 39. Iss. 1. P. 118–124. <https://doi.org/10.11860/j.issn.1673-0291-2015.01.020>.
3. Atkins M. D., Kienhöfer F. W., Kim Tongbeum. Flow behavior in radial vane brake rotors at low rotational speeds // Journal of Fluids Engineering. 2019. Vol. 141. Iss. 8. P. 081105. <https://doi.org/10.1115/1.4042470>.
4. Indira R., Bharatish A. Optimization of ventilated brake disc rotor geometry for enhanced structural characteristics // Journal of Measurements in Engineering. 2020. Vol. 8. Iss. 3. P. 98–106. <https://doi.org/10.21595/jme.2020.21399>.
5. Nejat A., Aslani M., Mirzakhali E., Najian Asl R. Heat transfer enhancement in ventilated brake disk using double airfoil vanes // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2011. Vol. 3. Iss. 4. P. 045001. <https://doi.org/10.1115/1.4004931>.
6. Рудов П. К. Методика расчета эффективного радиуса трения в дисковом тормозе с накладками трапецидальной формы // Вестник белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2006. № 1-2. С. 15–21.
7. Panelli M., Cardone G. Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators // Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, ASME-UIT-ATI: Proceedings International Conference. Sorrento, 2010. <https://doi.org/10.13140/2.1.3525.7122>.
8. Nosko O. Partition of friction heat between sliding semispaces due to adhesion-deformational heat generation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 64. P. 1189–1195. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.056>.
9. Nosko O. Analytical study of sliding instability due to velocity- and temperature-dependent friction // Tribology Letters. 2016. Vol. 61. No. 1. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0628-9>.
10. Mortazavi V., Wang Chuanfeng, Nosonovsky M. Stability of frictional sliding with the coefficient of friction depended on the temperature // Journal of Tribology. 2012. Vol. 134. Iss. 4. P. 041601. <https://doi.org/10.1115/1.4006577>.
11. Úradníček J., Musil M., Bachratý M., Havelka F. Destabilization of disc brake mechanical system due to non-proportional damping // Engineering mechanics: Proceedings 26th International Conference (Brno, 24–25 November, 2020). Brno: Brno University of Technology Institute of Solid Mechanics, Mechatronics and Biomechanics, 2020. P. 496–499. <https://doi.org/10.21495/5896-3-496>.
12. Du Xuzhi, Yang Zhigang, Li Qiliang, Zhao Lanping. Brake disc cooling characteristics of a passenger car // Journal of Tongji University. 2016. <https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.020>.
13. Mamtaz F., Hossain A., Sharmin N. Solution of boundary layer and thermal boundary layer equation // Asian Research Journal of Mathematics. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 1–15. <https://doi.org/10.9734/ARJOM/2018/45267>.
14. Vasu B., Prasad V. R., Bég O. A. Thermo-diffusion and diffusion-thermo effects on boundary layer flows // Chemical Engineering Journal. 2011. Vol. 173. P. 598–606.
15. Bhattacharyya K., Layek G. Slip effect on diffusion of chemically reactive species in boundary layer flow over a vertical stretching sheet with suction or blowing // Chemical Engineering Communications. 2011. Vol. 198. Iss. 11. P. 1354–1365. <https://doi.org/10.1080/00986445.2011.560515>.
16. Pringle J. Instabilities in the bottom boundary layer reduce boundary layer arrest, allowing cross-isobath spread of downwave flows and ventilating the boundary layer // Earth and Space Science Open Archive. 2021. <https://doi.org/10.1002/essoar.10506113.1>.
17. Kaushik M. Boundary layers // Theoretical and Experimental Aerodynamics. Singapore: Springer, 2019. P. 251–284. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1678-4_11.
18. Поляков П. А. Связь между режимом протекания воздушного потока и теплоотдачей от поверхностей

вентиляционного аппарата тормозного диска // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 8. С. 184–190. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-8-184-190>.

19. Jiang Feng, Xu Weilin, Deng Jun, Wei Wangru. Flow structures of the air-water layer in the free surface region of high-speed open channel flows // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5903763>.

20. Tarafder Md. Sh., Naz N. Analysis of potential flow around two-dimensional body by finite element method // *Journal of Mechanical Engineering Research*. 2015. Vol. 7. Iss. 2. P. 9–22. <https://doi.org/10.5897/JMER2014.0342>.

References

1. Bhure S. Analysis of ventilated disc brake rotor using CFD to improve its thermal performance. In: *6th International set Conference Vellore*. January 2013 – May 2013, Tamil Nadu, Vellore. Vellore: School of mechanical building and science, VIT University; 2013.

2. Pan Like, Han J., Li Z., Yang Z., Li W. Numerical simulation for train brake disc ventilation. *Journal of Beijing Jiaotong University*. 2015;39(1):118-124. <https://doi.org/10.11860/j.issn.1673-0291-2015.01.020>.

3. Atkins M. D., Kienhöfer F. W., Kim Tongbeum. Flow behavior in radial vane brake rotors at low rotational speeds. *Journal of Fluids Engineering*. 2019;141(8):081105. <https://doi.org/10.1115/1.4042470>.

4. Indira R., Bharatish A. Optimization of ventilated brake disc rotor geometry for enhanced structural characteristics. *Journal of Measurements in Engineering*. 2020;8(3):98-106. <https://doi.org/10.21595/jme.2020.21399>.

5. Nejat A., Aslani M., Mirzakhilili E., Najian Asl R. Heat transfer enhancement in ventilated brake disk using double airfoil vanes. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2011;3(4):045001. <https://doi.org/10.1115/1.4004931>.

6. Rudov P. K. The procedure of design of effective radius of friction of a disk brake with overlays trapezoid form. *Vestnik belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport = Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2006;1-2:15-21. (In Russ.).

7. Panelli M., Cardone G. Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators. In: *Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, ASME-UIT-ATI: Proceedings International Conference*. Sorrento; 2010. <https://doi.org/10.13140/2.1.3525.7122>.

8. Nosko O. Partition of friction heat between sliding semispaces due to adhesion-deformational heat generation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013;64:1189-1195. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.056>.

9. Nosko O. Analytical study of sliding instability due to velocity- and temperature-dependent friction. *Tribology Letters*. 2016;61(1). <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0628-9>.

10. Mortazavi V., Wang Chuanfeng, Nosonovsky M. Stability of frictional sliding with the coefficient of friction depended on the temperature. *Journal of Tribology*. 2012;134(4):041601. <https://doi.org/10.1115/1.4006577>.

11. Úradníček J., Musil M., Bachratý M., Havelka F. Destabilization of disc brake mechanical system due to non-proportional damping. In: *Engineering mechanics: Proceedings 26th International Conference*. 24–25 November, 2020, Brno. Brno: Brno University of Technology Institute of Solid Mechanics, Mechatronics and Biomechanics; 2020, p. 496-499. <https://doi.org/10.21495/5896-3-496>.

12. Du Xuzhi, Yang Zhigang, Li Qiliang, Zhao Lanping. Brake disc cooling characteristics of a passenger car. *Journal of Tongji University*. 2016. <https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.020>.

13. Mamtaz F., Hossain A., Sharmin N. Solution of boundary layer and thermal boundary layer equation. *Asian Research Journal of Mathematics*. 2018;11(4):1-15. <https://doi.org/10.9734/ARJOM/2018/45267>.

14. Vasu B., Prasad V. R., Bég O. A. Thermo-diffusion and diffusion-thermo effects on boundary layer flows. *Chemical Engineering Journal*. 2011;173:598-606.

15. Bhattacharyya K., Layek G. Slip effect on diffusion of chemically reactive species in boundary layer flow over a vertical stretching sheet with suction or blowing. *Chemical Engineering Communications*. 2011;198(11):1354-1365. <https://doi.org/10.1080/00986445.2011.560515>.

16. Pringle J. Instabilities in the bottom boundary layer reduce boundary layer arrest, allowing cross-isobath spread of downwave flows and ventilating the boundary layer. *Earth and Space Science Open Archive*. 2021. <https://doi.org/10.1002/essoar.10506113.1>.

17. Kaushik M. Boundary layers. In: *Theoretical and Experimental Aerodynamics*. Singapore: Springer; 2019, p. 251-284. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1678-4_11.

18. Polyakov P. A. Relationship between airflow and heat discharge from the surfaces of the ventilation device brake disc. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University*. 2021;8:184-190. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-8-184-190>.

19. Jiang Feng, Xu Weilin, Deng Jun, Wei Wangru. Flow structures of the air-water layer in the free surface region of high-speed open channel flows. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020;2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5903763>.

20. Tarafder Md. Sh., Naz N. Analysis of potential flow around two-dimensional body by finite element method. *Journal of Mechanical Engineering Research*. 2015;7(2):9-22. <https://doi.org/10.5897/JMER2014.0342>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Поляков Павел Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
НПЦ «Охрана труда»,
Ростовский государственный университет
путей сообщения,
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского
Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Россия

Заявленный вклад автора

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 24.12.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel A. Polyakov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Researcher of the Research and Production
Center "Occupational Health and Safety",
Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opol-
cheniya Sq.,
Rostov-on-Don, 344038, Russia

Contribution of the author

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

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 15.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 24.12.2021.

Original article

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-733-740>

Analysis of the temperature-frequency effect on dielectric losses in a grain medium

Marina Yu. Buzunova¹✉¹ Irkutsk State University of Agriculture named after A. A. Ezhevsky, Molodezny Settlement, Irkutsk region, Russia
bmirk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8911-5784>

Abstract. The aim of the study is to determine the influence of the thermal effect on dielectric losses in grain mass subject to bruising during drying and storage on the example of wheat across a wide external electric field frequency range. The study of the electrophysical characteristics of a dispersed medium comprising mechanically activated wheat grains takes into account the effect of the degree of breakage on the dielectric parameters of the studied medium. The studies were carried out on experimental samples having different degrees of mechanical activation of particles, which ranged in size from 50 to 1000 μm . Variations in the dielectric loss tangent were studied using the dielectric method across a wide temperature-frequency range. Studies of variations in dielectric properties were carried out for wheat samples subjected to grinding according to the mechanical activation method at temperatures varying from 20°C to 255°C with a constant heating rate of 0.7 deg / min. During the course of the experiment, the frequency of the external electric field was varied from 25 Hz to $1 \cdot 10^6$ Hz. Dielectric constant and dielectric loss tangent calculations were carried out using data on electrical capacity and conductivity obtained using an E7-20 immittance meter and a measuring cell in the form of a flat capacitor. An analysis of variations in these dielectric characteristics was also performed. The obtained stable correlation of the dielectric loss tangent with the frequency of external electric impact and the degree of heating of the samples was most pronounced for finely dispersed samples (particle size 50 μm). Variations in dielectric characteristics are most significant when the frequency decreases to 100 Hz and below. The study of variations in the main dielectric parameters can be used to prevent self-heating and ignition of the grain mass during storage, as well as for selecting the most efficient energy-saving drying mode.

Keywords: dispersed medium, mechanical activation, dielcometry, wheat, dielectric losses, dielectric constant

For citation: Buzunova M. Yu. Analysis of the temperature-frequency effect on dielectric losses in a grain medium. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):733-740. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-733-740>.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 537.226.3:536.3:633.11

Анализ температурно-частотного воздействия на диэлектрические потери в зерновой среде

Марина Юрьевна Бузунова¹✉¹ Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, Иркутский р-н, п. Молодежный, Россия
bmirk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8911-5784>

Резюме. Цель – изучение влияния термического воздействия на диэлектрические потери в зерновой массе, подверженной травмированию при сушке и хранении на примере пшеницы в широком диапазоне частот внешнего электрического поля; изучение электрофизических характеристик дисперсной среды, состоящей из подверженных механоактивации зерен пшеницы, с учетом влияния степени измельчения на диэлектрические показатели исследуемой среды. Исследования проведены для экспериментальных образцов с разной степенью механоактивации частиц – от 50 до 1000 μm . Диэлектрический метод, применяемый в широком температурно-частотном диапазоне, позволил изучить вариации тангенса угла диэлектрических потерь для различных условий. Исследования вариаций диэлектрических свойств проведены для образцов пшеницы, подверженных измельчению мето-

дом механоактивации при вариации температуры от 20°C до 255°C с постоянной скоростью нагрева, составляющей 0,7 град/мин. Частота внешнего электрического поля при проведении эксперимента варьировалась от 25 Гц до $1 \cdot 10^6$ Гц. При помощи измерителя иммитанса E7-20 и измерительной ячейки в виде плоского конденсатора получены данные по электрической емкости, проводимости; сделаны расчеты диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Проведен анализ вариаций данных диэлектрических характеристик. Отмечено наличие устойчивой корреляции тангенса угла диэлектрических потерь с частотой внешнего электрического воздействия и степенью нагрева образцов, наиболее ярко выраженной для мелкодисперсных образцов (размер частиц 50 мкм). Вариации диэлектрических характеристик наиболее значимы при уменьшении частоты до 100 Гц и ниже. Изучение вариаций основных диэлектрических параметров дает возможность предупредить самосогревание и возгорание зерновой массы в процессе хранения и выбрать наиболее эффективный энерго-сберегающий режим сушки.

Ключевые слова: дисперсная среда, механоактивация, диэлькометрия, пшеница, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость

Для цитирования: Бузунова М. Ю. Анализ температурно-частотного воздействия на диэлектрические потери в зерновой среде // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 733–740. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-733-740>.

INTRODUCTION

Issues associated with finding an effective solution for Russia's food supply program that takes into account current issues of energy conservation are currently under focused consideration. At the same time, basic aspects of food security involving the introduction and optimization of state-of-the-art methods in processes such as grain drying remain relevant. Due to the energy-intensive nature of such production processes, it becomes important to obtain solutions that optimize electricity consumption at the same time as ensuring compliance with the necessary conditions for grain storage and drying [1–3].

The quality and duration of grain storage is determined by the unique features of the medium, including its physical properties. The primary electrophysical properties of grain are expressed in terms of its moisture content during drying [4], along with temperature and the frequency of its external electric field. Changes in moisture quantity during grain storage leads to changes in its physical characteristics. In the present paper, such variations are considered on the example of mechanically activated wheat, which represents a model of grain mass which has been bruised during drying and storage. In a mechanically damaged grain medium, increased air exchange releases heat leading to possible combustion or otherwise unusable grain mass [5]. During grain storage, the presence of an active ventilation system helps to resolve fire safety issues [6, 7]. Such electrophysical indicators as electrical conductivity, permittivity and the tangent of the dielectric loss angle depend on

the moisture content of grain [8].

Dielectric parameters of grain crops, such as permittivity, are used to calculate the humidity of the medium. In [9], a description of the variations in the dielectric properties of the grain medium is presented along with the observation that an increase in the dielectric constant is associated with an increase in moisture content and a decrease in frequency and that the tangent of the loss angle increases or decreases with changes in humidity and frequency. A mathematical model is presented for determining the dielectric characteristics of wheat in order to calculate the dielectric losses when with changes in frequency from 5 MHz to 12 GHz for different wheat moisture levels from 3% to 24% by measuring the dielectric properties. Temperature variations, explained in terms of changes in the state and amount of moisture absorbed by the grain mass, also lead to a serious change in the electrophysical properties.

The dependence of the dielectric parameters of the mechanically activated grain medium on the level of dispersion of samples, as well as the frequency of external electrical and temperature effects, is presented in [10–12]. The results of the described experiment demonstrate that the dependence of inhomogeneous physical properties determined by the size of the specific surface area of the fine-dispersed system is obtained as a result of mechanical activation on temperature and frequency [12, 13]. A failure to maintain the storage conditions of grain in terms of required temperature and humidity may result in the release a large amount of heat leading to its spontaneous combustion; this can be ex-

plained in terms of micro-stimulated currents occurring in such an inhomogeneous environment even in the absence of external voltage [10].

The purpose of the present work is to study the variation of the main electrophysical characteristics of a mechanically activated dispersed heterogeneous medium on the example of samples of grain crops (wheat) having particle fractions ranging from 50 to 1000 μm . Experimental studies were carried out with changes in the frequency of the external electric field from 25 Hz to $1 \cdot 10^6$ Hz and temperature changes from 20°C to 250°C at a constant heating rate of 0.7 degrees / min in order to determine the degree of variation of the studied electrophysical characteristics of wheat from the level of particle grinding and the nature of the frequency-temperature effect.

MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH AND THEIR DISCUSSION

The study of variations in electrical energy losses (the tangent of the dielectric loss angle $\text{tg}\delta$) is determined by the magnitude of the electric current flowing in a dielectric medium. This comprises a polar dielectric whose molecules absorb moisture such as to actively affect its electrophysical properties. It is well known that dielectric systems characterized by nonpolar molecules and negligible impurities are characterized by a low level of dielectric losses. However, solid dielectrics, which in most cases are polar mainly represented by organic compounds and substances, differ in significant dielectric losses as a result of their characteristic dipole-relaxation polarization, especially at radio frequencies.

The dependence of the dielectric losses of the dispersed medium of mechanically activated wheat can be understood as a part of the electrical energy converted into heat at an alternating voltage. Dielectric losses occurring during heat treatment of grain mass are caused by electrical conductivity and polarization, which is established gradually under the influence of an electric field to cause heating of the substance under study. For the experiment, samples of bruised grain with different particle sizes in a wide temperature-frequency range were used.

As the main research method, we selected the method of dielectrometry, which is widely used in practice in determining electrophysical characteristics, such as dielectric losses, electrical capacitance, conductivity, dielectric permittivity, etc., to investigate the molecular structure of the substance under study [14]. We referred to the model of the influence of various physical conditions through their dielectric parameters on the electrical properties of agricultural materials of the dielectric properties of agricultural crops in addition to calculations was presented in [15]. Taking into account the fact that the moisture level in agricultural products affects its safety and the vital activity of microorganisms, its effect on dielectric properties should also be taken into account. Comprising an example of a polar dielectric, the water forming part of the mechanoactivated grain is the main component affecting its dielectric properties. When modeling technological conditions for processing agricultural products, it is important to take into account the dependence of electrophysical properties on environmental parameters: temperature and frequency of the electric field [15].

The materials for the experiment comprised mechanically activated wheat samples with a variation in particle size from 50 to 1000 μm , forming a typical example of a finely dispersed heterogeneous heterogeneous system. Experimental data were obtained using a precision instrument of the E7-20 immitance meter of accuracy class 0.1 with a wide range of operating frequencies from 25 Hz to $1 \cdot 10^6$ Hz. After using this meter to obtain measurements of electrical capacitance and electrical conductivity, the calculation of the real part of the dielectric constant and the tangent of the dielectric loss angle was carried out. In addition to the E7-20 immitance meter, a specially measuring cell having a diameter of 21 mm comprising a flat capacitor with round aluminum electrodes was used. The samples of bruised grain were subjected to uniform heating in the temperature range from 20°C to 255°C at a fixed rate of 0.7 deg/min. To measure the temperature of the samples, a chromel-alumel thermocouple is used. The relative permittivity of the samples was calculated as the ratio of the capacitance of a capacitor with a substance to the capacitance of a capaci-

tor without a substance.

The tangent of the dielectric loss angle was calculated in terms of frequency ν , electrical capacitance C and electrical conductivity G :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega RC} = \frac{G}{2\pi\nu C}. \quad (1)$$

The dielectric method for studying the electronic structure of a substance and the nature of its molecular interactions is based on measuring the electrical capacitance and studying the polarization process in a polar dielectric on the example of mechanically activated wheat under the influence of an external electric field. The most important parameters determining the properties of the dielectric are: permittivity, whose variations are considered for the grain medium in [11–13], and the angle of dielectric losses δ , defined as complementary to the angle j (up to 90°) of the phase shift between current and voltage.

Experimental data for the electrical capacitance and conductivity of the bruised grain were obtained for the frequency range from 25 to $1 \cdot 10^6$ Hz by the digital meter E7-20 with a measurement accuracy of 0.2 pF for electrical capacity and 1 pS for electrical conductivity. The scheme of the experimental setup used to study the temperature and frequency variations of electrophysical parameters is given in [16]. After sending the data obtained using an analog-to-digital converter to a personal computer for further processing, the necessary tables and diagrams were compiled, and the electrophysical parameters were calculated.

Calculations of dielectric losses of fine grain samples were carried out in a temperature range from 20°C to 255°C along with changes in the frequency of the electric field from 25 Hz to 10^6 Hz. The spatially inhomogeneous charge distribution acquired by the studied grain samples as a result of mechanical activation when heated comprising an additional energy reserve that affects the value of electrophysical parameters.

Fig. 1 shows variations in the dielectric loss tangent for wheat samples with different degrees of grinding at a frequency of 1000 Hz depending on the temperature. The average increase in die-

lectric losses in the range from 65°C to 120°C can be explained in terms of the weakening of intermolecular forces, which in turn facilitates the rotation of dipoles in the electric field. The bruised grain mass can be taken as a polar dielectric having an appropriate permittivity maximum whose dielectric loss angle tangent is explained by the temperature rise. The increase in dielectric losses with an increase in temperature in the studied samples is associated with the phenomenon of desorption of water molecules from damaged chipped grains as a result of their drying. This can also be explained in terms of an increase in the mobility of dipoles when heated, making it easier for them to unfold under the influence of an electric field, which leads to an increase in $\operatorname{tg} \delta$. With further heating, the kinetic energy of the thermal motion of the dipoles actively increases, the intensity of Brownian motion increases, followed by disorientation of the dipoles. The resulting decrease in dielectric losses and permittivity with a further increase in temperature above 120°C corresponds to the literature data [11, 16].

Fig. 1 shows that, for the largest sample with a particle size from 500 to 1000 μm in the temperature range up to 150°C , the maximum value of $\operatorname{tg} \delta = 0.45$ corresponds to $T = 96.1^\circ\text{C}$: for sample 2 having a particle size of 251–500 μm , $\operatorname{tg} \delta = 0.97$ at $T = 96^\circ\text{C}$, while, for sample 3, which has the lowest degree of particle dispersion, $\operatorname{tg} \delta = 1.6$ at $T = 100.5^\circ\text{C}$.

In the temperature range of 185.4 – 188.3°C , there is a second additional maximum, whose presence can be explained by the gradual destruction of the structure of the substance under study during grain combustion. Undoubtedly, the values of the electrophysical parameters depend on many factors including the moisture level in the substance [17]. Analysis of the measurement results showed that the most finely dispersed sample (particle size 50 μm) in the temperature-frequency range under study is characterized by a more significant dielectric permeation and dielectric losses. This can be explained in terms of the cumulative increase in the total area of the specific surface of the substance of smaller samples during grain grinding. For larger samples, variations in electrophysical parameters are noticeably smoother. In the range from

129.3°C to 166.3°C, variations in dielectric losses of samples with particle sizes of 251–500 μm and 500–1000 μm are less noticeable. In the smallest sample having a grain size of 50 μm , the maximum value increases when approaching the boiling point of water, increasing the polarization of the substance and resulting in more active orientation of the domains when placed in an electric field [18–20]. The experimental data

obtained clearly characterize the behavior of relaxation structures characteristic of polar dielectrics when placed in an electric field.

Fig. 2 demonstrates the temperature dependence of the tangent of the dielectric loss angle for a wide range of frequencies for the most finely dispersed sample with a particle size of less than 50 μm .

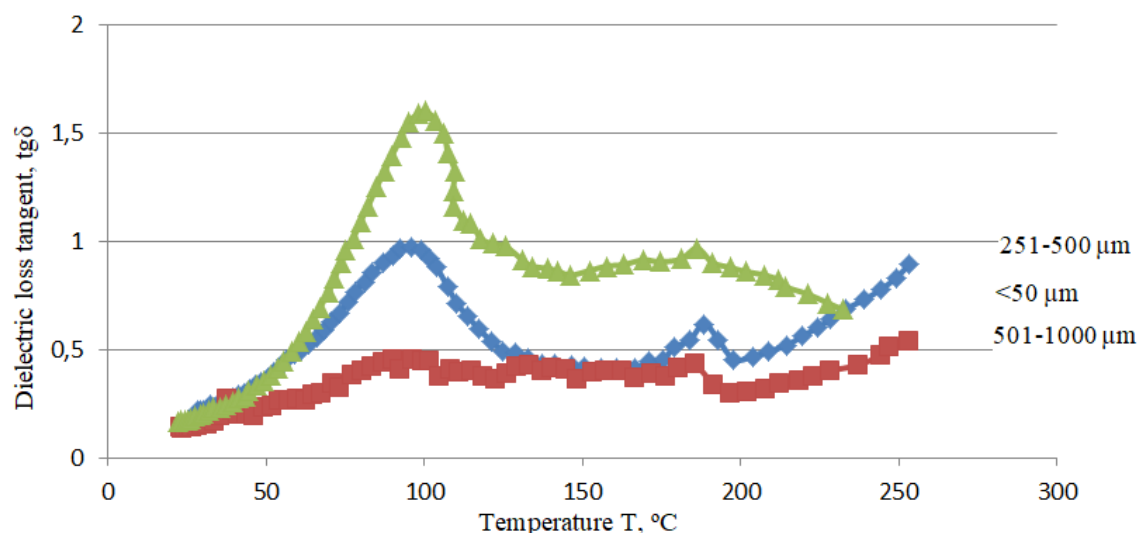


Fig. 1. Variations of the tangent of the dielectric loss angle on temperature for wheat samples with dispersion: 501–1000 μm ; 251–500 μm and less than 50 μm

Рис. 1. Вариации тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для образцов пшеницы дисперсностью: 501–1000 μm ; 251–500 μm и менее 50 μm

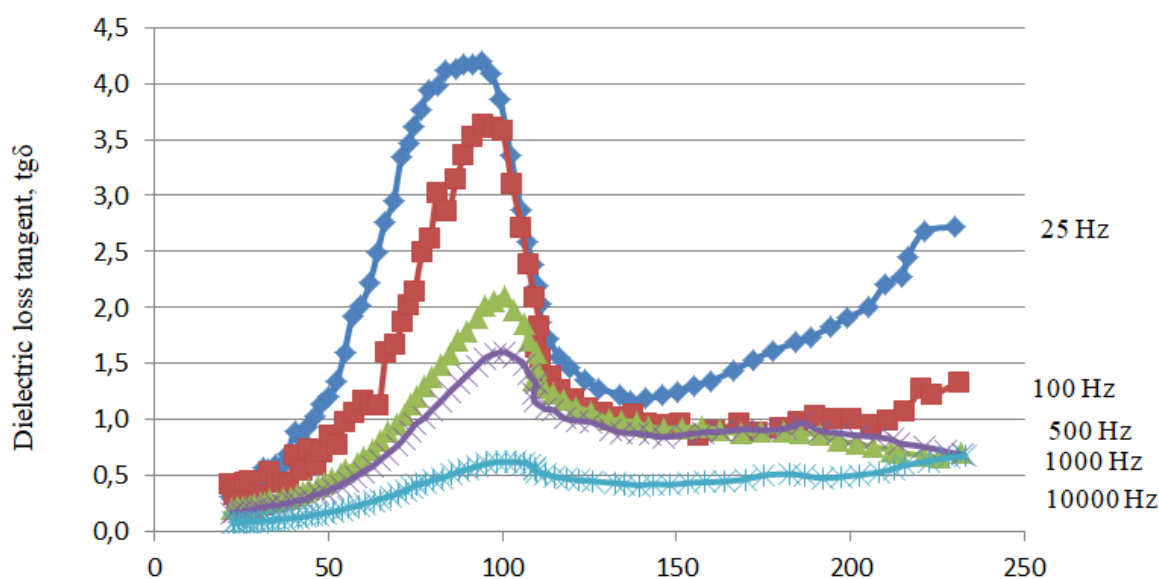


Fig. 2. Variations of the dielectric loss tangent on temperature for wheat samples with a dispersion 50 μm for various frequencies: 25 Hz, 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz and 10000 Hz

Рис. 2. Вариации тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для образцов пшеницы дисперсностью 50 μm для различных частот: 25 Гц, 100 Гц, 500 Гц, 1000 Гц и 10000 Гц

Data analysis confirms the significant dependence of dielectric losses in the grain mass on the frequency of the external electric field, which is most significant in the low-frequency range from 25 to 100 Hz. The sharp decreases in $\tan\delta$ with a further increase in the frequency to 500 Hz and above can be explained by a weakening of the dipole-orientation polarization in the disordered medium under study, the decrease in the kinetic energy and ion path length, as well as the probability of their collision with the structural elements of matter.

Therefore, an increase in the frequency of the electric field leads to a decrease in dielectric losses. The maximum value of dielectric losses, which corresponds to a frequency of 25 Hz, is 4.13 at a temperature of 86.4°C: for a frequency of 100 Hz, it is 3.63 at a temperature of 94.5°C; for a frequency of 500 Hz and above, the maximum value of dielectric losses decreases sharply comprising 2.05 at a temperature of 97.6°C for a frequency of 100 Hz, 1.6 at a temperature of 97.9°C and a frequency of 10000 Hz, and 0.62 at a temperature of 100.2°C.

Fig. 2 depicts distinctive features corresponding to an increase in $\tan\delta$ with an increase in temperature above 150°C. These occur mainly for the low-frequency region due to the destruction of the structure and combustion of the substance of a polar dielectric having a rather complex composition. With an increase in the frequency of external electrical action, the ion path length and kinetic energy decrease, the possibility of molecular interaction weakens and, accordingly, dielectric losses decrease.

As a result of the experiment, it was found that the dielectric losses in the bruised grain medium in a temperature range from 20°C to 250°C have a maximum at a temperature of

86.4–100.2°C. This close to the boiling point of water, which forms part of the studied samples and affects their electrophysical properties. Cracks and chips of bruised grain play the role of electrically charged defects that attract polar water molecules to trigger the interfacial Coulomb interaction mechanism at the interface.

CONCLUSION

The conducted studies demonstrated the presence of a stable correlation of the dielectric parameters of an inhomogeneous heterogeneous medium on the example of finely dispersed wheat samples having varying fractional components depending on the frequency of the external electric field and temperature. In the studied disordered systems, the significant decrease in the tangent of the dielectric loss angle $\tan\delta$ is due to the degeneration of dipole-orientation polarization and increase in the frequency of the external electric field.

By analyzing the spectra of the tangent of the dielectric loss angle, we were able to establish the presence of higher electrical activity for experimental samples of a small-sized structure and an increase in the dielectric permittivity and tangent of the dielectric loss angle, which was most pronounced at frequencies below 100 Hz. The established dependence of the tangent of the dielectric loss angle $\tan\delta$ on the frequency of the external electric field and temperature is especially significant for finely dispersed wheat samples.

The study of the dependence of the electrophysical properties of finely dispersed heterogeneous media on the example of wheat can be important in modeling and optimizing the drying process of grain crops and the selection of an effective energy-saving mode.

References

1. Nepomniashchii E. P., Sukyasov S. V. Selection of the optimal mode of drying grain for storage in the Irkutsk region. In: *Nauchnye issledovaniya studentov v reshenii aktual'nyh problem agropromyshlennogo kompleksa: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Students' scientific research in solving relevant problems of the agro-industrial complex: materials of All-Russian scientific and practical conference* 5–6 March 2020, Irkutsk. Vol. 3. Irkutsk: Irkutsk State Agricultural University named after A. A. Ezhevsky; 2020, p. 61–68. (In Russ.).
2. Budnikov D. A. The results of studying the energy efficient modes of grain drying using microwave radiation. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2020;67(1):22–27. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-22-27>.
3. Budnikov D. A. Improving energy efficiency of grain drying with the use of electro-physical effects. *Polzunovskij al'manah*. 2020;1:123–128. (In Russ.).
4. Budnikov D. A. Determination of the dielectric loss fac-

tor of a grain-air mixture. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2018;1:7-14. (In Russ.).

5. Panova T. V., Panov M. V. Modeling grain damage process under drying. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii = Bulletin of the Bryansk State Agrarian University*. 2020;6:66-71. (In Russ.).

6. Dvoenko O., Chenin A. Reducing fire hazard during grain and seeds drying and storage. *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya*. 2020;3:26-32. (In Russ.).

7. Chenin A. N., Belova T. I. Increasing fire safety at grain storage and drying. In: *Nauchnoe tvorchestvo studentov – razvitiyu agropromyshlennogo kompleksa: sbornik XXXIX studencheskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Scientific work of students – development of the agro-industrial complex: collected works of XXXIX students' scientific and technical conference*. 18 March 2020, Bryansk. Bryansk: Bryansk State Agrarian University; 2020, p. 97-102. (In Russ.).

8. Tsymbalova V. M., Atakhanov R. V., Lavrentiev A. A. Experimental study of cereal product dielectric permittivity. In: *Innovacionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii (ITNO-2017): materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Innovative technologies in science and education (ITSE-2017): Proceedings of V anniversary international scientific and practical conference*. 11–15 September 2017, Divnomorskoe. Rostov-na Donu: DGTU-Print; 2017, p. 334-337. (In Russ.).

9. Nelson S. *Dielectric properties of agricultural materials and their applications*. London: Academic Press; 2005, 292 p.

10. Buzunova M. Y., Bonnet V. V. Mechanism of thermally stimulated current occurrence in fine heterogeneous medium on the example of grain crops. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;421(5). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052032>.

11. Buzunova M. Y., Bonnet V. V. Temperature condition influence analysis on the mechanoactivated wheat dielectric constant. *Applied Physics and Cyber-Physical Systems. Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022042>.

12. Buzunova M. Yu. Investigation of dielectric structural properties of fine heterogeneous systems on the example of grain. *Bajkal'skij vestnik DAAD = Baikal letter DAAD*.

2019;1:124-129. (In Russ.).

13. Buzunova M. Y. Dielectric dispersion of mechanoactivated grain crops. *Vestnik Irkutskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii = Vestnik IrGSHA*. 2019;92:25-32. (In Russ.).

14. Gorohovatskij Ju. A., Bordovskij G. A. *Thermal activation current spectroscopy of high-resistance semiconductors and dielectrics*. Moscow: Nauka; 1991, 244 p. (In Russ.).

15. Budnikov D. A., Tsymbal A. A. Dielectric properties of agricultural materials. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2016;3(18):154-159. (In Russ.).

16. Buzunova M. Yu., Bonnet V. V. Dielectric losses of mechanically activated grain crops during heat treatment. In: *III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agri-business, Environmental Engineering and Biotechnologies. Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;548. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052063>.

17. Tsymbal A. A., Budnikov D. A. The grain dielectric properties. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mehanizacii zhivotnovodstva = Journal of VNIIMZH*. 2016;4:52-55. (In Russ.).

18. Tanaev A. B., Shcherbachenko L. A., Bezrukova Y. V., Tsydygov S. B., Buzunova M. Y., Baryshnikov D. S., et al. Peculiarities of the accumulation and transport of electret charges in fine-sized disordered structures due to internal voltage. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2017;62(3):406-412. <https://doi.org/10.1134/S1063784217030239>.

19. Shourygina N. A., Scherbachenko L. A., Donskoy V. I., Karnakov V. A., Troshev A. A., Krasnov D. A. Electrical phenomena at interfaces in heterogeneous poly mineral systems dispersed. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki = St. Petersburg Polytechnic University Journal – Physics and Mathematics*. 2012;1:93-100. (In Russ.).

20. Shcherbachenko L. A., Borisov V. S., Maksimova N. T., Baryshnikov E. S., Karnakov V. A., Marchuk S. D., et al. Electret effect and electrotransport in disperse organic and in-organic systems. *Technical Physics*. 2009;54(9):1372-1379. <https://doi.org/10.1134/S1063784209090199>.

Список источников

1. Непомнящий Е. П., Сукиясов С. В. Выбор оптимального способа сушки зерна в условиях хранения в Иркутской области // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: матер. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 5–6 марта 2020 г.). Т. III. Иркутск: Изд-во Иркутского ГАУ, 2020. С. 61–68.

2. Будников Д. А. Результаты эксперимента по определению энергоэффективных режимов сушки зерна с применением микроволнового излучения // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 1. С. 22–27. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-22-27>.

3. Будников Д. А. Повышение энергоэффективности сушки зерна с применением электрофизических воздействий // Ползуновский альманах. 2020. № 1. С. 123–128.

4. Будников Д. А. Определение фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 1. С. 7–14.

5. Панова Т. В., Панов М. В. Моделирование процесса травмирования зерна при сушке // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 6. С. 66–71.

6. Двоенко О. В., Ченин А. Н. Снижение пожарной опасности при сушке и хранении зерна и семян // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 3. С. 26–32.

7. Ченин А. Н., Белова Т. И. Повышение пожарной безопасности при хранении и сушке зерна // Научное творчество студентов – развитию агропромышленного комплекса: сб. XXXIX студ. науч.-техн. конф. (г. Брянск, 18 марта 2020 г.). Брянск: Изд-во Брянского

ГАУ, 2020. С. 97–102.

8. Цымбалова В. М., Атаханов Р. В., Лаврентьев А. А. Экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости крупяной продукции // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2017): матер. V Междунар. науч.-практ. конф. (с. Дивногорское, 11–15 сентября 2017 г.). Ростов-на Дону: Изд-во «ДГТУ-Принт», 2017. С. 334–337.

9. Nelson S. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. London: Academic Press, 2005. 292 p.

10. Buzunova M. Yu., Bonnet V. V. Mechanism of thermally stimulated current occurrence in fine heterogeneous medium on the example of grain crops // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 421. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052032>.

11. Buzunova M. Yu., Bonnet V. V. Temperature condition influence analysis on the mechanoactivated wheat dielectric constant // Applied Physics and Cyber-Physical Systems. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022042>.

12. Бузунова М. Ю. Исследование диэлектрических и структурных свойств мелкодисперсных гетерогенных систем на примере зерновых // Байкальский вестник ДААД. 2019. № 1. С. 124–129.

13. Бузунова М. Ю. Диэлектрическая дисперсия механоактивированных зерновых культур // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. Вып. 92. С. 25–32.

14. Гороховатский Ю. А., Бордовский Г. А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Изд-во «Наука», 1991. 244 с.

15. Будников Д. А., Цымбал А. А. Диэлектрические

свойства сельскохозяйственных материалов // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3. С. 154–159.

16. Buzunova M. Yu., Bonnet V. V. Dielectric losses of mechanically activated grain crops during heat treatment // III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agri-business, Environmental Engineering and Biotechnologies. Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 548. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052063>.

17. Цымбал А. А., Будников Д. А. Диэлектрические свойства зерновых // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016. № 4. С. 52–55.

18. Tanaev A. B., Shcherbachenko L. A., Bezrukova Y. V., Tsydypov S. B., Buzunova M. Y., Baryshnikov D. S., et al. Peculiarities of the accumulation and transport of electret charges in fine-sized disordered structures due to internal voltage // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 62. No. 3. P. 406–412. <https://doi.org/10.1134/S1063784217030239>.

19. Шурыгина Н. А., Щербаченко Л. А., Донской В. И., Карнаков В. А., Трошев А. А., Краснов Д. А. Электрические явления на межфазных границах в гетерогенных полиминеральных дисперсных системах // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2012. № 1. С. 93–100.

20. Shcherbachenko L. A., Borisov V. S., Maksimova N. T., Baryshnikov E. S., Karnakov V. A., Marchuk S. D., et al. Electret effect and electrotransport in disperse organic and inorganic systems // Technical Physics. 2009. Vol. 54. No. 9. P. 1372–1379. <https://doi.org/10.1134/S1063784209090199>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Marina Yu. Buzunova,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Electrical Equipment and Physics,
Irkutsk State Agrarian University named
after A.A. Ezhevsky,
1/1, Molodezhny settlement, Irkutsk region,
Irkutsk district, 664038, Russia

Contribution of the author

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

Conflict of interests

The author declares no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 31.08.2021; approved after reviewing 12.10.2021; accepted for publication 21.12.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бузунова Марина Юрьевна,

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования и физики,
Иркутский государственный аграрный университет
им. А. А. Ежовского,
664038, Иркутская область, Иркутский р-н,
п. Молодежный, 1/1, Россия

Заявленный вклад автора

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.08.2021; одобрена после рецензирования 12.10.2021; принята к публикации 21.12.2021.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.316.3

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-741-752>

Управление мощностью регулируемых конденсаторов в электрических сетях по критерию минимума потерь энергии

Станислав Сергеевич Гиршин^{1✉}, Елена Григорьевна Андреева²,
Константин Владимирович Хацевский³, Владислав Михайлович Троценко⁴,
Николай Андреевич Мельников⁵, Елена Владимировна Петрова⁶,
Владимир Николаевич Горюнов⁷

¹⁻⁷ Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹stansg@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0650-1880

²lenandr02@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-1303-669X

³xkv-post@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-9504-1312

⁴troch_93@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4250-371X

⁵nik_mel_98@mail.ru

⁶evpetrova2000@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7866-5630

⁷vladimirgoryunov2016@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-4707-2023

Резюме. Цель – управление передаваемой реактивной мощностью в электрических сетях с помощью регулируемой конденсаторной батареи по критерию минимума потерь энергии при различных годовых графиках реактивной нагрузки и разном числе регулировочных секций. Основные теоретические соотношения и выводы получены методами математического моделирования и интегрального исчисления с использованием элементов теории оптимального управления. Оценка степени влияния мощности и числа секций конденсаторной батареи на потери энергии в сети производилась с помощью вычислительных экспериментов. Получены выражения для собственных потерь энергии в конденсаторной батарее, а также для снижения потерь энергии в сети, справедливые при линеаризованных графиках нагрузки. Показано, что зависимости собственных потерь энергии в конденсаторной батарее и снижения потерь в сети от мощности секции имеют точки излома и проходят через максимум. Наличие точек излома обусловлено изменением числа секций конденсаторной батареи, работающих в течение всего года. Прохождение зависимостей через максимум объясняется тем, что при повышении мощности конденсаторной батареи уменьшается время работы при полном числе регулировочных секций. Установлено, что батареи статических конденсаторов с двумя регулировочными секциями позволяют снизить потери энергии на передачу реактивной мощности на 90% и более. Для трех- и четырехсекционных батарей статических конденсаторов снижение потерь приближается к 100%. Процент снижения потерь энергии возрастает при увеличении степени заполнения годового графика реактивной нагрузки. Для снижения потерь энергии в электрической сети требуются конденсаторные батареи с числом регулировочных секций не более трех-четырех, а в большинстве случаев достаточно двух секций.

Ключевые слова: конденсаторная батарея, потери энергии, график нагрузки, компенсация реактивной мощности, оптимальное управление, регулируемая конденсаторная установка

Для цитирования: Гиршин С. С., Андреева Е. Г., Хацевский К. В., Троценко В. М., Мельников Н. А., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Управление мощностью регулируемых конденсаторов в электрических сетях по критерию минимума потерь энергии // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 741–752. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-741-752>.

Power management of variable capacitors in electrical grid systems according to the criterion of minimum energy loss

Stanislav S. Girshin^{1✉}, Elena G. Andreeva², Konstantin V. Khatsevskiy³,
Vladislav M. Trotsenko⁴, Nikolay A. Melnikov⁵, Elena V. Petrova⁶, Vladimir N. Goryunov⁷

¹⁻⁷Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹stansg@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0650-1880

²lenandr02@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-1303-669X

³xkv-post@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-9504-1312

⁴troch_93@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4250-371X

⁵nik_mel_98@mail.ru

⁶evpetrova2000@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7866-5630

⁷vladimirgoryunov2016@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-4707-2023

Abstract. The aim is to manage the transmitted reactive power in electrical grids using variable capacitor batteries according to the criterion of minimum energy loss under different annual reactive load schedules and different numbers of variable capacitor sections. The main theoretical relations were obtained by the methods of mathematical modelling and integral calculus using the theory of optimal control. The influence of the power and number of sections in a capacitor battery on energy losses in the grid was estimated using computational experiments. Dependencies for energy losses in a capacitor battery, as well as for reducing energy losses in the grid, were obtained. These expressions are valid for linearized load schedules. It is shown that the dependences of energy losses in a capacitor battery and the reduction of losses in the grid on the section power have inflection points and pass through a maximum. The presence of inflection points is associated with a change in the number of capacitor sections operating throughout the year. The presence of a maximum is explained by the fact that, with an increase in the power of the capacitor battery, its operating time decreases under the complete number of variable sections. It is established that the batteries of static capacitors with two variable sections can reduce energy losses when transmitting reactive power by over 90%. For three- and four-section static capacitors, the loss reduction is close to 100%. The reduction in energy losses increases when approaching maximal levels of annual reactive load. Energy losses in electrical grid systems can be reduced by capacitor batteries with no more than three or four variable sections. In most cases, this can be achieved by two-section capacitor batteries.

Keywords: capacitor bank, energy losses, load graph, reactive power compensation, optimal control, adjustable capacitor unit

For citation: Girshin S. S., Andreeva E. G., Khatsevskiy K. V., Trotsenko V. M., Melnikov N. A., Petrova E. V., Goryunov V. N. Power management of variable capacitors in electrical grid systems according to the criterion of minimum energy loss. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):741-752. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-741-752>.

ВВЕДЕНИЕ

Компенсация реактивной мощности представляет собой одно из наиболее эффективных мероприятий по снижению потерь энергии в электрических сетях⁸ [1–6]. При этом большинство современных компенсирующих устройств позволяет осуществлять управление реактивной мощностью [7–10]. Средства управления, с одной стороны, дают возможность дополнительного снижения потерь энергии, но, с другой – приводят к увеличению стоимости компенсирующих устройств. Чтобы осуществить технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств оди-

наковой мощности, но с разными системами управления, требуется решить следующие задачи:

- определить критерии и закон управления реактивной мощностью компенсирующих устройств;

- произвести анализ влияния системы управления реактивной мощностью на потери энергии.

Развитие методов оптимального выбора компенсирующих устройств идет в направлении учета топологии сети, дискретности номинальных мощностей и некоторых других факторов [4, 6, 11–13]. Оптимальное управ-

⁸ РТМ 36.18.32.6-92. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. Введ. 01.01.1993. М., 1993. 32 с.

ление реактивной мощностью играет важную роль для надежной и оптимальной работы энергосистемы. За последние годы разработан целый ряд стратегий для решения проблемы оптимального управления реактивной мощностью. Ввиду особой важности количество публикаций по данному направлению не уменьшается и в настоящее время. Заслуживает внимание работа [14], в которой для решения задачи оптимизации предложена математическая модель, учитывающая зависимость мощности от напряжения сети. Целевая функция включает в себя капитальные затраты для батареи статических конденсаторов (БСК) с возможностью переключения по ступеням, а также эксплуатационные расходы, зависящие от потерь энергии. В работе [15] для определения оптимального места установки и мощности БСК реализована математическая модель, основанная на методе множества (роя) частиц. На базе использования модели отмечаются улучшения уровня напряжения в системе, минимизация потерь энергии в линиях и повышение коэффициента мощности. В исследованиях, приведенных в [16], предлагается система коррекции коэффициента мощности в режиме реального времени. Система основана на использовании многоступенчатых БСК в совокупности с резонансными фильтрами. Результаты, полученные в [17], связаны с реализацией актуальной современной тенденции одновременного управления БСК, генераторами и конфигурацией сети. Отмечается преимущество предложенного метода над существующими алгоритмами в плане повышения эффективности передачи энергии. В обзоре [18] представлен обширный перечень статей по современным методам решения задач оптимизации реактивной мощности. Аналитический обзор, представленный в работе [19], можно рассматривать как универсальный источник информации по методам оптимального распределения реактивной мощности. Несмотря на большое количество статей по рассматриваемой проблеме, различию между регулируемыми и нерегулируемыми БСК с точки зрения потерь энергии не уделялось достаточного внимания. Такой подход неизбежно приводит к тому, что оптимальными

для установки оказываются конденсаторные батареи с минимальным количеством секций, так как они имеют меньшую стоимость. Фактически это будет верно только при равномерных графиках нагрузки. Во всех остальных случаях часть времени конденсаторные установки будут работать с неполным количеством секций, что приведет к существенным закономерностям в изменениях потерь энергии. В статье рассмотрены энергетические эффекты применения регулируемых конденсаторных установок и проведен анализ соответствующих закономерностей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим электрическую сеть, содержащую линию W и трансформатор T , к шинам низкого напряжения (НН) которого подключена БСК (рис. 1). Пусть управление БСК осуществляется по критерию минимума потерь энергии в сети с учетом собственных потерь в БСК:

$$\Delta W(Q_{БСК}) = \int_0^{8760} \left(\frac{(Q(t) - Q_{БСК})^2}{U^2} R + p_{yo} Q_{БСК} \right) dt \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где p_{yo} – удельные потери активной мощности в конденсаторной батарее; R – суммарное активное сопротивление линии и трансформатора; U – напряжение в узле нагрузки (обычно приведенное к высокой стороне).

Перекомпенсацию будем считать недопустимой, то есть между реактивной мощностью нагрузки $Q(t)$ и рабочей мощностью БСК $Q_{БСК}$ в любой момент времени t должно выполняться соотношение: $Q(t) \geq Q_{БСК}$.

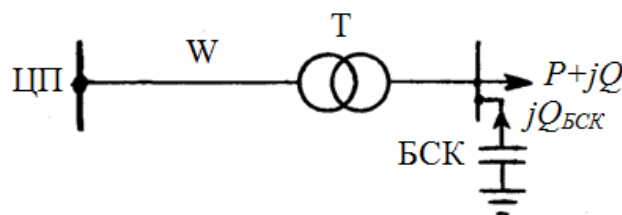


Рис. 1. Электрическая сеть
Fig. 1. Power grid

Как показано в [20], выполнение этого условия является также и критерием оптимального управления. Если реактивная мощность нагрузки уменьшается со временем, то очередная секция БСК должна отключаться только при достижении полной компенсации $Q(t) = Q_{БСК}$, ($\cos \varphi = 1$). Собственные потери активной мощности в БСК малы, поэтому суммарные потери в режиме полной компенсации будут меньше, чем потери при отключении еще одной секции БСК. Таким образом, любое управление БСК по критерию поддержания $\cos \varphi$ на уровне меньше единицы заведомо не является оптимальным.

Предположим, что годовой график реактивной мощности можно аппроксимировать линейной функцией следующего вида [21]:

$$Q(t) = Q_{\max} \left(1 - \frac{t}{t_0} \right), \quad (2)$$

$$0 \leq t \leq \min \{t_0, 8760 \text{ ч}\},$$

где $Q_{\max}$ – годовой максимум реактивной мощности; t_0 – параметр графика, характеризующий степень его заполнения.

Предложенная аппроксимация дает достаточно хорошие результаты при расчете потерь энергии. Использование функции (2)

позволяет представить процесс оптимального управления БСК графически (рис. 2).

Потери энергии в батарее статических конденсаторов. Введем следующие обозначения: $Q_{БСК, \text{ном}}$ – номинальная мощность БСК; n – число секций БСК; Q_c – мощность одной секции; $p_{\text{уд}}$ – удельные потери активной мощности в БСК (на единицу вырабатываемой реактивной мощности); $Q_{\min}$ – годовой минимум реактивной мощности нагрузки.

Число неотключаемых секций (находящихся в работе круглый год) можно определить по выражению:

$$k = \text{int} \left(\frac{Q_{\min}}{Q_c} \right), \text{ но не более чем } n. \quad (3)$$

Значение $Q_{\min}$ в рамках принятой модели графика нагрузки определяется по формуле (2) при подстановке верхнего предела времени t . Если $t_0 \leq 8760 \text{ ч}$ (что соответствует времени использования максимума реактивной нагрузки $T_{\max, Q} \leq 4380 \text{ ч}$), то формула (2) дает $Q_{\min} = 0$. Этот результат может не соответствовать реальным условиям. Однако если фактическое значение $Q_{\min}$ не больше,

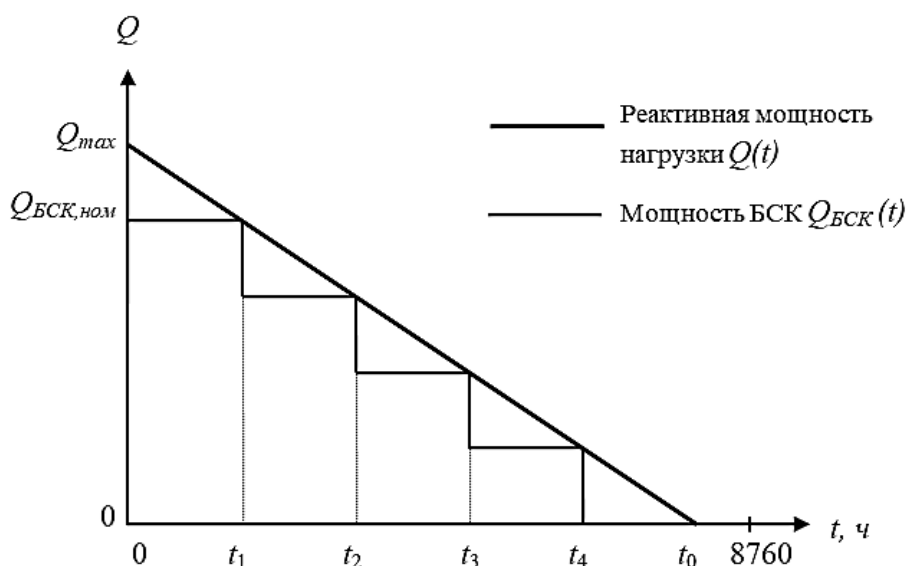


Рис. 2. Пример годовой диаграммы оптимального управления батареями статических конденсаторов
 Fig. 2. Example of an annual diagram for optimal control of a static capacitor bank

чем мощность секции БСК, то погрешность при этом не вносится, так как режим полного отключения БСК не влияет на рассмотренные ниже составляющие потерь.

Потери активной мощности в БСК в каждый момент времени пропорциональны вырабатываемой реактивной мощности:

$$\Delta P_{БСК}(t) = p_{yo} Q_{БСК}(t). \quad (4)$$

Годовые потери энергии в БСК определяются интегралом вида:

$$\Delta W_{БСК} = p_{yo} \int_0^{8760} Q_{БСК}(t) dt. \quad (5)$$

Фактически интегрирование сводится к суммированию произведений потерь мощности на каждой ступени годового графика мощности БСК на продолжительность ступени (см. рис. 2). Границы между ступенями t_i представляют собой условные моменты отключения i -й секции БСК. Из рис. 2 непосредственно следует, что

$$t_i = t_0 \left(1 - (n - i + 1) \frac{Q_c}{Q_{\max}} \right). \quad (6)$$

Выполнив интегрирование, после некоторых преобразований можно получить следующую формулу для годовых потерь энергии в БСК:

$$\Delta W_{БСК} = p_{yo} t_0 (n - k) Q_c - p_{yo} t_0 \frac{n(n+1) - k(k+1)}{2} \frac{Q_c^2}{Q_{\max}} + 8760 p_{yo} k Q_c. \quad (7)$$

Первые два слагаемых в совокупности представляют собой потери энергии в отключаемых секциях, а последнее – потери в секциях, работающих без отключения. На рис. 3 показан пример зависимости потерь энергии в БСК от мощности секции для четырехсекционной БСК при $t_0 = 12000$ ч (по площади под графиком нагрузки это соответствует $T_{\max, Q} \leq 5560$ ч). Потери энергии выражены в процентах от потерь, которые возникли бы круглогодичной работе БСК мощностью $Q_{\max}$

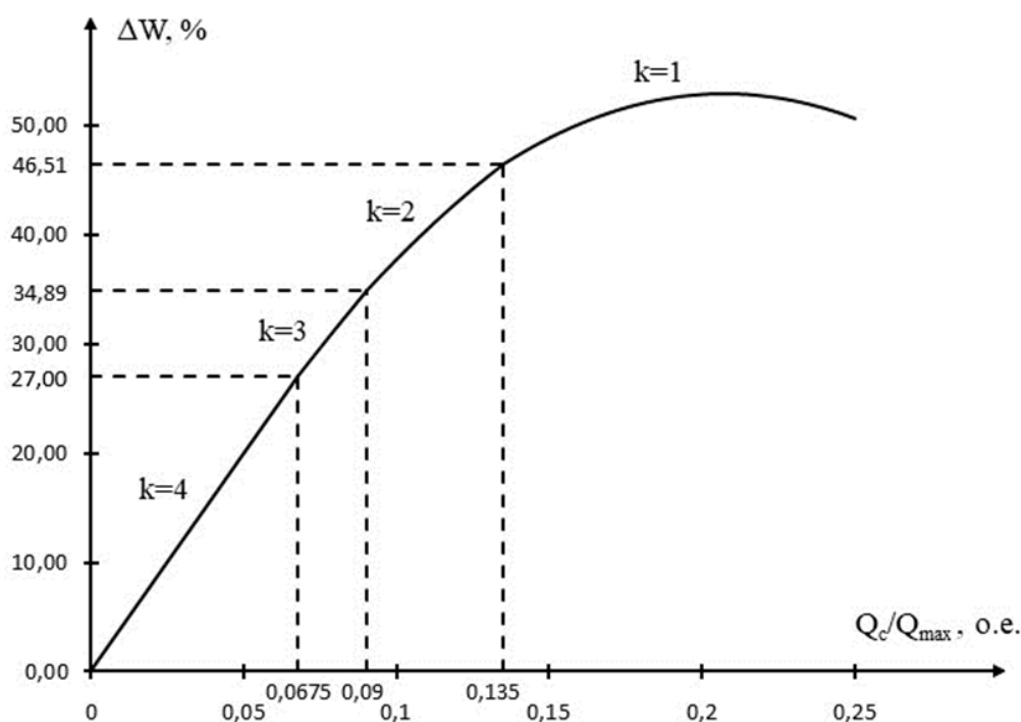


Рис. 3. Зависимость потерь энергии в четырехсекционной батарее статических конденсаторов от мощности секции

Fig. 3. Energy losses in a four-section static capacitor bank vs section power

Зависимость разделяется на четыре участка, отличающихся друг от друга числом секций k , работающих без отключения. Полной компенсации соответствует значение при (т.е. при полной компенсации) равных $8760 p_{yo} Q_{\max} \cdot \frac{Q_c}{Q_{\max}} = 0,25$. Так как оно меньше

отношения минимальной мощности нагрузки к максимальной (0,27 по формуле (2)), то участок, где $k = 0$, в данном случае отсутствует.

Участки с разным числом k разделены точками излома. При $k = 4$ зависимость линейна. На последующих участках появляются отключаемые секции, и зависимость становится нелинейной вследствие того, что при увеличении мощности секций снижается продолжительность их работы. При $k = 1$ фактор времени становится настолько значимым, что зависимость переходит через максимум и начинает убывать. Максимальные потери в рассматриваемом случае составляют 52,9% и наблюдаются при $\frac{Q_c}{Q_{\max}} = 0,207$.

Рассмотрим влияние регулируемой БСК на потери энергии в сети от центра питания (ЦП) до шин НН трансформаторной подстанции (см. рис. 1). Строго говоря, это влияние распространяется как на нагрузочные потери, так и на потери холостого хода, и обусловлено не только изменением реактивной мощности, но и изменением напряжения в узле нагрузки. Однако напряжение в узле нагрузки зависит не только от мощности БСК, но и от способа регулирования напряжения в центре питания, а также от режимов энергосистемы в целом. Будем считать, что в центре питания осуществляется встречное регулирование напряжения, при котором напряжение в некотором эквивалентном узле нагрузки поддерживается на постоянном уровне. Пусть шины НН рассматриваемой подстанции примерно соответствуют этому узлу. Такое допущение позволяет исключить влияние напряжения на потери энергии. В результате можно будет считать, что БСК влияет только на нагрузочные потери энергии, обусловленные передачей только реактивной мощности.

Необходимо заметить, что при изменениях напряжения будет изменяться как мощность БСК (пропорционально квадрату напряжения), так и реактивная мощность нагрузки (в соответствии со статическими характеристиками по напряжению). Статические характеристики реактивной мощности по напряжению обычно близки к квадратичным зависимостям. Поэтому отношение мощностей БСК и нагрузки, используемые в дальнейших выкладках, при изменении напряжения остаются примерно постоянными.

При выборе БСК имеет значение не абсолютная величина потерь энергии в сети, а их снижение. С учетом принятых допущений потери активной мощности в линии и трансформаторе (см. рис. 1) при установке БСК в каждый момент времени снижаются на величину:

$$\delta P(t) = \frac{Q^2(t) - (Q(t) - Q_{БСК}(t))^2}{U^2} R. \quad (8)$$

Годовое снижение потерь энергии в линии и трансформаторе равно интегралу от снижения потерь мощности:

$$\delta W = \int_0^{8760} \delta P(t) dt. \quad (9)$$

После интегрирования и преобразований окончательно получим:

$$\begin{aligned} \delta W = & \frac{Q_c Q_{\max}}{U^2} R \times \\ & \times \left[t_0 n - \frac{(8760 - t_0)^2}{t_0} k - \right. \\ & - \frac{Q_c}{Q_{\max}} (t_0 n^2 + (8760 - t_0) k^2) + \\ & \left. + \frac{1}{3} \left(\frac{Q_c}{Q_{\max}} \right)^2 t_0 (n^3 - n - k^3 + k) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 4 показана зависимость снижения потерь энергии в сети от мощности секции БСК, построенная при тех же условиях, что и

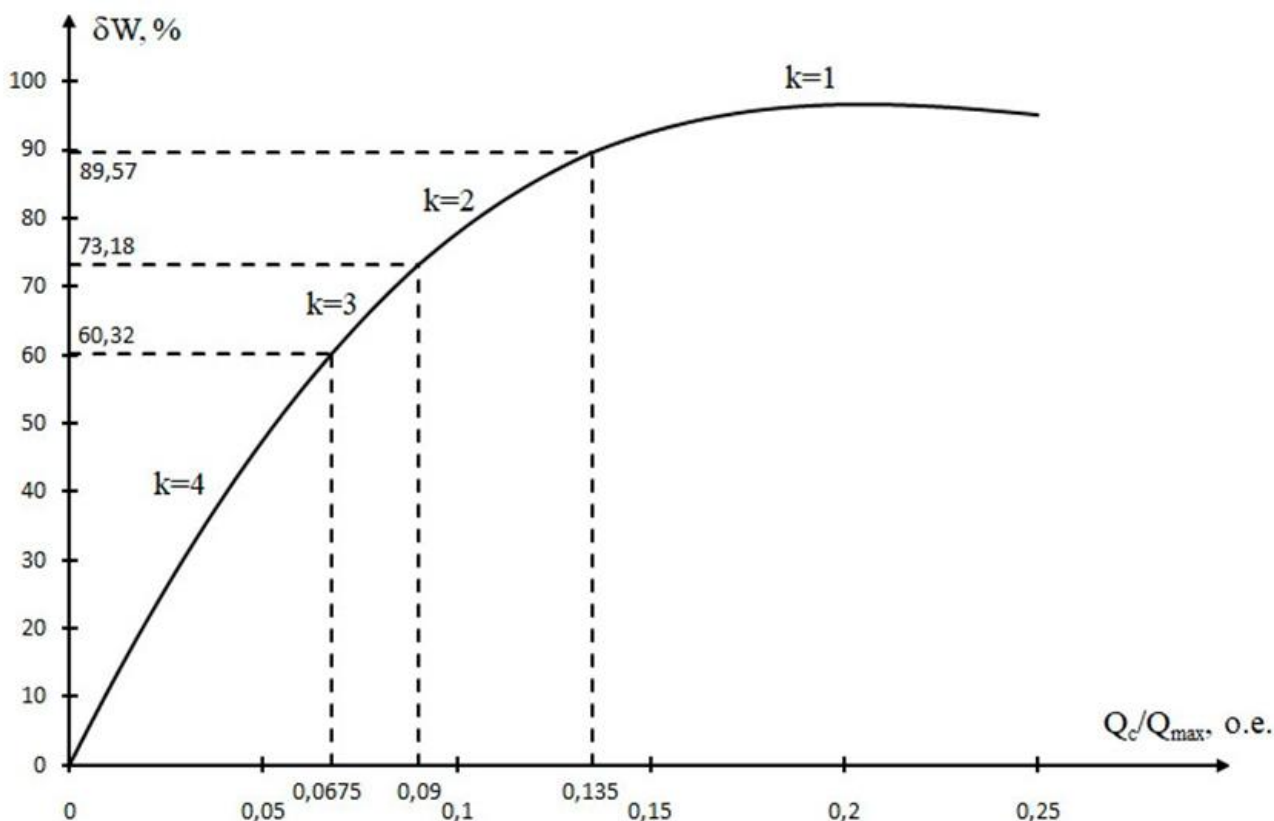


Рис. 4. Зависимость снижения потерь энергии в сети от мощности секции четырехсекционной батареи статических конденсаторов
Fig. 4. Reduction of grid energy losses vs section power of a four-section static capacitor bank

рис. 3. Снижение потерь энергии выражено в процентах от потерь на передачу реактивной мощности до установки БСК (в исходном режиме), которые равны

$$\delta W_{исх} = \frac{R}{U^2} \int_0^{8760} Q^2(t) dt = \frac{Q_{max}^2}{U^2} R \left[1 - \frac{8760}{t_0} + \frac{1}{3} \left(\frac{8760}{t_0} \right)^2 \right] 8760. \quad (11)$$

Полученная зависимость проходит через максимум при $\frac{Q_c}{Q_{max}} = 0,207$. Максимальное снижение потерь составляет 96,8%.

Влияние числа секций на максимальное снижение потерь. Запишем снижение выражения потерь энергии в относительных единицах в явной форме, разделив (10) на (11):

$$\delta W_{отн} = \frac{\delta W}{\delta W_{исх}} = \frac{aQ_{отн}^3 - bQ_{отн}^2 + cQ_{отн}}{1 - \frac{1}{t_{отн}} + \frac{1}{3t_{отн}^2}}. \quad (12)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$Q_{отн} = \frac{Q_c}{Q_{max}} \text{ (мощность секции в о.е.);} \quad (13)$$

$$t_{отн} = \frac{t_0}{8760}; \quad (14)$$

$$a = \frac{t_{отн}}{3} (n^3 - n - k^3 + k); \quad (15)$$

$$b = t_{отн} n^2 + (1 - t_{отн}) k^2; \quad (16)$$

$$c = t_{отн} n - \left(t_{отн} + \frac{1}{t_{отн}} - 2 \right) k. \quad (17)$$

Согласно формуле (12), зависимость снижения потерь от мощности секции в общем случае представляет собой кубическую параболу, которая проходит через максимум в точке:

$$Q_{отн, экстр} = \begin{cases} \frac{b - \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a}, & a \neq 0, \\ \frac{c}{2b}, & a = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Формула (18) справедлива в том случае, если полученное значение попадает на участок зависимости $\delta W(Q_c)$, соответствующий принятому значению k . В противном случае максимальное снижение потерь будет находиться либо на другом участке зависимости, либо в точке излома (на границе участков).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице представлены результаты расчета максимального снижения потерь $\delta W_{отн, макс}$ при разном времени использования максимума реактивной нагрузки $T_{max, Q}$ и при

различных числах секций. Значения t_0 определялись исходя из равенства площадей под графиками нагрузки по формуле:

$$t_0 = \frac{8760^2}{2(8760 - T_{max, Q})}. \quad (19)$$

Расчет производился в диапазоне $T_{max, Q}$ от 4380 до $0,875 \cdot 8760 = 7665$ ч. Значение 4380 ч соответствует максимальному диапазону изменения реактивной мощности нагрузки. При меньших значениях $T_{max, Q}$ будут наблюдаться те же условия, что и при 4380 ч, но с уменьшенным масштабом времени. Предельное значение $T_{max, Q} = 8760$ ч не рассматривалось, так как при этом график нагрузки становится равномерным, и БСК будет работать без регулирования.

Максимальное снижение потерь на передачу реактивной мощности изменяется от 75% при нерегулируемой БСК и $T_{max, Q} = 8760$ ч до 98% при четырехсекционной БСК и $T_{max, Q} = 7665$ ч. В первом случае

Результаты расчета максимального снижения потерь в сети
 Results of calculating the maximum reduction of losses in the grid

$T_{max, Q}, ч / h$	$t_0, ч / h$	$t_{отн}$	n	k	$Q_{отн, экстр}$	$\delta W_{отн, макс}$		Тип точки
						о.е. / р.и.в.	%	
$0,5 \cdot 8760 = 4380$	8760	1	1	0	1/2	3/4	75	экстремум
			2	0	1/3	8/9	88,89	
			3	0	1/4	15/16	93,75	
			4	0	1/5	24/25	96	
$0,625 \cdot 8760 = 5475$	11680	4/3	1	0	1/2	16/21	76,19	экстремум = излом
			2	0	1/3	0,903	90,3	
			3	1	1/4	20/21	95,23	
			4	1	0,2052	0,9679	96,79	
$0,75 \cdot 8760 = 6570$	17520	2	1	1	1/2	6/7	85,71	экстремум = излом
			2	1	0,3629	0,9248	92,48	экстремум
			3	2	1/4	27/28	96,43	экстремум = излом
			4	2	0,2103	0,9747	97,47	экстремум
$0,875 \cdot 8760 = 7665$	35040	4	1	1	3/4	36/37	97,3	излом
			2	2	3/8	36/37	97,3	
			3	3	1/4	36/37	97,3	
			4	3	0,2147	0,9801	98,01	

реактивная нагрузка в течение года меняется на 100%, во втором случае – на 25% от максимальной мощности. При $T_{\max,Q} = 7665$ ч максимальное снижение потерь практически не зависит от числа секций, а при числе секций $n = 4$ максимальное снижение потерь практически не зависит от $T_{\max,Q}$, т.е. от графика реактивной нагрузки. Наиболее существенный эффект наблюдается при переходе от нерегулируемой БСК к БСК с двумя секциями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Зависимость снижения потерь энергии в сети от мощности БСК с учетом регулирования проходит через максимум, причем мощность БСК в точке максимума не достигает наибольшей мощности нагрузки. Это значит,

что полная компенсация реактивной мощности нецелесообразна даже в тех случаях, когда собственные потери в БСК малы, а ее стоимость по тем или иным причинам можно не учитывать. В равной степени это справедливо также для нерегулируемых БСК. Исключением является равномерный график нагрузки.

2. БСК с двумя секциями позволяют снизить потери энергии на передачу реактивной мощности на 90% и более почти при любых графиках нагрузки. Для трех- и четырехсекционных БСК снижение потерь приближается к 100%. Таким образом, для снижения потерь энергии требуется не более трех-четырех секций, а в большинстве случаев достаточно одной-двух секций. Большее число секций оправданно только в тех случаях, когда это необходимо для регулирования напряжения.

Список источников

1. Бигун А. Я., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 212.
2. Михеев Г. М., Атаманов М. Н., Афанасьева О. В., Дрей Н. М. О компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с косинусными конденсаторами // Электротехника. 2019. № 4. С. 32–41.
3. Girshin S. S., Bigun A. Ay., Ivanova E. V., Petrova E. V., Goryunov V. N., Shepelev A. O. The grid element temperature considering when selecting measures to reduce energy losses on the example of reactive power compensation // Przegląd Elektrotechniczny. 2018. Vol. 94. № 8. P. 101–104. <https://doi.org/10.15199/48.2018.08.24>.
4. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.
5. Арион В. Д., Каратун В. С., Пасинковский П. А. Компенсация реактивной мощности в условиях неопределенности исходной информации // Электричество. 1991. № 2. С. 6–11.
6. Ильяшов В. П. Конденсаторные установки промышленных предприятий. М.: Энергоиздат, 1983. 152 с.
7. Воротицкий В. Э., Жабин К. В., Колибаба В. И. Сравнительный анализ управления реактивной мощностью на электроэнергетических рынках зарубежных стран и России // Электрические станции. 2020. № 5. С. 8–19.
8. Петухов Р. А., Сизганова Е. Ю., Сизганов Н. В., Филатов А. Н. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электро-
9. снабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 123–146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-123-146>.
9. Насыров Р. Р., Альдженди Р. Выбор емкости конденсатора активного фильтра и метода управления его контроллером // Электротехника. 2020. № 1. С. 51–55.
10. Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Шунина А. А. Модифицированный алгоритм управления компенсатором реактивной мощности для нестационарных нагрузок // Электротехника. 2019. № 3. С. 11–14.
11. Трубицин М. А., Микаэльян Е. Ю. Расчет удельных приростов потерь при оптимизации реактивных мощностей в сложной электросети // Инженерный вестник Дона. 2019. № 6. С. 41.
12. Шпиганович А. Н., Рычков А. В. Оптимизация компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения со специфичной нагрузкой // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 1. С. 28–32.
13. Арион В. Д., Журавлев В. Г., Ставровский А. Н. Оптимизация выбора источников реактивной мощности в электроэнергетических системах. М.: Изд-во ВИНТИ, 1984. 63 с.
14. Home-Ortiz J. M., Vargas R., Macedo L. H., Romero R. Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in radial distribution systems considering voltage-dependent models // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 107. P. 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.11.035>.
15. Gonzalo G., Aguila A., Gonzalez D., Ortiz L. Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids // IEEE Latin America Transactions. 2020. Vol. 18. Iss. 3. P. 465–472.

<https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082717>.

16. Abdelhady S., Osama A., Shaban A., Elbayoumi M. A Real-time optimization of reactive power for an intelligent system using genetic algorithm // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 11991–12000. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965321>.

17. Fetouh T., Elsayed A. M. Optimal control and operation of fully automated distribution networks using improved tunicate swarm intelligent algorithm // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 129689–129708. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009113>.

18. Muhammad Ya., Khan R., Raja M. A. Z., Ullah F., Chaudhary N. I., He Yigang. Solution of optimal reactive power dispatch with FACTS devices: a survey // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 2211–2229. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.030>.

19. Saddique M. Sh., Bhatti A. R., Haroon Sh. S., Sattar M. K., Amin S., Sajjad I. A., et al. Solution to optimal reactive power dispatch in transmission system using meta-heuristic techniques – Status and technological review // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 178. P. 106031. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106031>.

20. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Шепелев А. О. Оптимальное управление конденсаторными батареями в распределительных сетях // Ученые Омска – региону: матер. II Регион. науч.-техн. конф. (г. Омск, 6–7 июня 2017 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. С. 75–79.

21. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Ширяев А. С., Коваленко Д. В. Выбор конденсаторных батарей в электрических сетях с учетом отключения при малых нагрузках // Промышленная энергетика. 2019. № 12. С. 12–18.

References

1. Bigun A. Ya., Girshin S. S., Petrova E. V., Goryunov V. N. Accounting conductor temperature increased bandwidth when selecting measures to reduce energy loss by the example of reactive power compensation. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2015;1-1:212. (In Russ.).

2. Mikheev G. M., Atamanov M. N., Afanasieva O. V., Drey N. M. On reactive power compensation in power supply systems with cosine capacitors. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2019;4:32-41. (In Russ.).

3. Girshin S. S., Bigun A. Ay., Ivanova E. V., Petrova E. V., Goryunov V. N., Shepelev A. O. The grid element temperature considering when selecting measures to reduce energy losses on the example of reactive power compensation. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2018;94(8):101-104. <https://doi.org/10.15199/48.2018.08.24>.

4. Zhelezko Yu. S. *Reactive power compensation in complex electrical systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1981, 200 p. (In Russ.).

5. Arion V. D., Karatun V. S., Pasinkovskij P. A. Reactive power compensation in conditions of initial information uncertainty. *Elektrichestvo*. 1991;2:6-11. (In Russ.).

6. Il'yashov V. P. *Condenser installations of industrial enterprises*. Moscow: Energoatomizdat; 1983, 152 p. (In Russ.).

7. Vorotnitskiy V. E., Zhabin K. V., Kolibaba V. I. Comparative analysis of reactive power control in foreign electric power markets and in Russia. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2020;5:8-19. (In Russ.).

8. Petukhov R. A., Sizganova E. Yu., Sizganov N. V., Filatov A. N. To the problem of automated control of reactive power flows in electrical energy supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(7):123-146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-123-146>. (In Russ.).

9. Nasyrov R. R., Al'dzhendi R. Selection of the capacitance of an active filter capacitor and the control method for its controller. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*.

2020;1:51-55. (In Russ.).

10. Vorotnikov I. N., Mastepanenko M. A., Gabrielyan Sh. Zh., Shunina A. A. A modified algorithm for controlling a reactive power compensator for transient loads. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2019;3:11-14. (In Russ.).

11. Trubitsin M. A., Mikael'yan E. Yu. Calculation of specific gains of losses in the optimization of reactive power in a complex power grid. *Inzhenernyy vestnik Dona = Don's Engineering Gazette*. 2019;6:41. (In Russ.).

12. Shpiganovich A. N., Rychkov A. V. Optimization of reactive power compensation with a specific load power supply systems. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya = News of higher educational institutions of the Chernozem region*. 2016;1:28-32. (In Russ.).

13. Arion V. D., Zhuravlev V. G., Stavrovskij A. N. *Selection optimization of reactive power sources in electric power systems*. Moscow: All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences; 1984, 63 p. (In Russ.).

14. Home-Ortiz J. M., Vargas R., Macedo L. H., Romero R. Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in radial distribution systems considering voltage-dependent models. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019;107:298-310. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.11.035>.

15. Gonzalo G., Aguila A., Gonzalez D., Ortiz L. Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids. *IEEE Latin America Transactions*. 2020;18(3):465-472. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082717>.

16. Abdelhady S., Osama A., Shaban A., Elbayoumi M. A real-time optimization of reactive power for an intelligent system using genetic algorithm. *IEEE Access*. 2020;8:11991-12000. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965321>.

17. Fetouh T., Elsayed A. M. Optimal control and operation of fully automated distribution networks using improved tunicate swarm intelligent algorithm. *IEEE Access*. 2020;8:129689-129708. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009113>.

18. Muhammad Ya., Khan R., Raja M. A. Z., Ullah F., Chaudhary N. I., He Yigang. Solution of optimal reactive power dispatch with FACTS devices: a survey. *Energy Reports*. 2020;6:2211-2229. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.030>.
19. Saddique M. Sh., Bhatti A. R., Haroon Sh. S., Sattar M. K., Amin S., Sajjad I. A., et al. Solution to optimal reactive power dispatch in transmission system using meta-heuristic techniques – status and technological review. *Electric Power Systems Research*. 2020;178:106031. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106031>.
20. Girshin S. S., Goryunov V. N., Shepelev A. O. Optimal

control of capacitor banks in distribution networks. *Uchenye Omska – regionu: materialy II Regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Scientists of the city of Omsk to the region: materials of II regional scientific and technical conference*. 6–7 June 2017, Omsk. Omsk: Omsk State Technical University; 2017, p. 75-79. (In Russ.).

21. Girshin S. S., Goryunov V. N., Shiryayev A. S., Kovalenko D. V. Selecting capacitor banks in electrical networks taking into account shutdowns at low loads. *Promyshlennaya energetika*. 2019;12:12-18. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гиршин Станислав Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Андреева Елена Григорьевна,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электрической техники,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Хацевский Константин Владимирович,

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электрической техники,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Троценко Владислав Михайлович,

ассистент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Мельников Николай Андреевич,

студент,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Петрова Елена Владимировна,

доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stanislav S. Girshin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Power Supply
for Industrial Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk, 644050, Russia

Elena G. Andreeva,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Electrical Engineering,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

Konstantin V. Khatsevskiy,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Electrical Engineering,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

Vladislav M. Trotsenko,

Assistant Professor of the Department of Power Supply
for Industrial Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk, 644050, Russia

Nikolay A. Melnikov,

Student,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

Elena V. Petrova,

Associate Professor of the Department of Power Supply
for Industrial Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

Горюнов Владимир Николаевич,

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электроснабжения
промышленных предприятий,
Энергетический институт,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

Vladimir N. Goryunov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Power Supply for Industrial
Enterprises,
Energy Institute,
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 19.10.2021; одобрена после рецензирования 25.11.2021; принята к публикации 28.12.2021.

Information about the article

The article was submitted 19.10.2021; approved after reviewing 25.11.2021; accepted for publication 28.12.2021.

Original article

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-753-761>

A new criterion of asymptotic stability for Hopfield neural networks with time-varying delay

Weiru Guo^{1✉}, Fang Liu²^{1,2}Central South University, Changsha, People's Republic of China¹weiruguo@csu.edu.cn, <http://orcid.org/0000-0002-7390-0400>²csuliufang@csu.edu.cn, <http://orcid.org/0000-0003-0750-8344>

Abstract. The objective of this paper is to analyze the stability of Hopfield neural networks with time-varying delay. For the system to operate in a steady state, it is important to guarantee the stability of Hopfield neural networks with time-varying delay. The Lyapunov-Krasovsky functional method is the main method for investigating the stability of time-delayed systems. On the basis of this method, the stability of Hopfield neural networks with time-varying delay is analysed. It is known that due to such factors as communication time, limited switching speed of various active devices, time delays often arise in various technical systems, which significantly degrade the performance of the system, which can in turn lead to a complete loss of stability. In this regard, a Lyapunov-Krasovsky type delay-product functional was constructed in the paper, which allows more information about the time delay and reduces the conservatism of the method. Then a generalized integral inequality based on the free matrix was used. A new criterion for asymptotic stability of Hopfield neural networks with time-varying delay, which has less conservatism, was formulated. The effectiveness of the proposed method is illustrated. Thus an asymptotic stability criterion for Hopfield neural networks with time-varying delay was formulated and justified. The expanded Lyapunov-Krasovsky functional is constructed on the basis of delay and quadratic multiplicative functional, and the derivative of the functional is defined by a matrix integral inequality with free weights. The effectiveness of the method is illustrated by a model example.

Keywords: hopfield neural networks, asymptotical stability, LKF method, time-varying delay

For citation: Guo Weiru, Liu Fang. A new criterion of asymptotic stability for Hopfield neural networks with time-varying delay. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):753-761. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-753-761>.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 518.5:517.977.58

Новый критерий асимптотической устойчивости нейронных сетей Хопфилда с переменным запаздыванием

Вэйжу Го^{1✉}, Фан Лю²^{1,2}Центральный Южный университет, г. Чанша, Китайская Народная Республика¹weiruguo@csu.edu.cn, <http://orcid.org/0000-0002-7390-0400>²csuliufang@csu.edu.cn, <http://orcid.org/0000-0003-0750-8344>

Резюме. Цель – анализ устойчивости нейронных сетей Хопфилда с изменяющейся во времени задержкой. Для того чтобы система могла работать в устойчивом состоянии, важно гарантировать устойчивость нейронных сетей Хопфилда с изменяющейся во времени задержкой. Метод функционала Ляпунова-Красовского является основным методом исследования устойчивости систем с временной задержкой. На основе данного метода в работе анализируется устойчивость нейронных сетей Хопфилда с изменяющейся во времени задержкой. Известно, что из-за таких факторов, как время связи, ограниченная скорость переключения различных активных устройств, в различных технических системах часто возникают временные задержки, которые существенно ухудшают работу системы, что может в свою очередь приводить к полной потере устойчивости. В связи с этим в работе был построен функционал Ляпунова-Красовского типа «delay-product», что позволяет использовать больше информации о временной задержке и уменьшать консерватизм метода. Затем было использовано обобщенное инте-

гральное неравенство на основе свободной матрицы. Сформулирован новый критерий асимптотической устойчивости нейронных сетей Хопфилда с изменяющейся во времени задержкой, который обладает меньшим консерватизмом. Проиллюстрирована эффективность предложенного метода. Таким образом, в работе сформулирован и обоснован критерий асимптотической устойчивости для нейронных сетей Хопфилда с изменяющейся во времени задержкой. При этом расширенный функционал Ляпунова-Красовского строится на основе запаздывания и квадратичного мультипликативного функционала, а производная функционала определяется матричным интегральным неравенством со свободными весами. Эффективность метода иллюстрируется на модельном примере.

Ключевые слова: нейронные сети Хопфилда, асимптотическая устойчивость, метод функционала Ляпунова-Красовского

Для цитирования: Го Вэйжу, Лю Фан. Новый критерий асимптотической устойчивости нейронных сетей Хопфилда с переменным запаздыванием // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 753–761. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-753-761>.

INTRODUCTION

It is well known that neural networks have many applications in the area of signal processing, pattern recognition etc. Hopfield neural network is one kind of neural networks given by J. J. Hopfield in 1982. In recent years, Hopfield neural networks (HNNs) has attracted an increasing attention since it has found many applications in classification of patterns, associative memory, image treatment, solving optimization problems and other areas [1–6]. Especially, HNNs have been widely applied in power system. For example, HNNs can solve the economic dispatch, which is a typical optimal problem in power system, and give a proper dispatch bringing great economic benefits. What's more, in the electric power network planning, HNNs can be used to select each load node's in-degree and direction of in-degree and the structure of distribution can be also decided. The problems of power flow can be solved by HNNs in the same time. However, the time-varying delay usually exists in the HNNs and it has a negative influence on system performance. It means the existence of time-varying delay will make the performance of the system to be worse and even make it instable. Therefore, the stability analysis of HNNs is a hot topic.

In the existing literature, the stability analysis of HNNs is often based on time-invariant delays or based on simple Lyapunov-Krasovskii functional in [7–12]. However, the conclusions are conservative due to the less information about delays in the LKF. Therefore, this article will analyze the stability of HNNs with time-varying delays based on the augmented Lyapunov-Krasovskii functional with delay-

product-type terms. [7] constructed a simple LKF for HNNs with time-invariant time delays, and obtained the stability criterion by using the time-delay segmentation method. The more time-delay segments, the lower the conservativeness, but the computational complexity also increased. [8] constructed an augmented LKF with more information about delays for HNNs with time-varying delays, and analyze its stability by the free weight matrix method. It still has room to decrease the conservativeness in terms of LKF construction and processing of functional derivatives. In terms of LKF construction, augmented LKF that contain more information of delays has been used widely. For example, [13] proposed two new LKFs with delay-product-type terms. The relationship between time delay and quadratic terms is changed from simple addition to multiplication. It can effectively reduce the conservatism of the conclusion. On the other hand, the derivative processing aspect of the functional is mainly changed from the free weight matrix method [14] to the integral inequality method, such as Jensen inequality [15], Wirtinger inequality [16], B-L inequality [17], auxiliary function-based integral inequalities [18] and so on. The generalized free matrix integral inequality proposed in [19], which is based on Legendre series. By introducing some free matrices, the integral term can be estimated more tightly. Besides the two aspects mentioned above, how to find the condition that guarantees the negative definiteness of the derivative of LKFs is also important, especially when the derivative is a quadratic function with respect to the time-varying delay. The sufficient condition reported in [20] is commonly used but recently a

relaxed quadratic function negative-determination lemma is proposed in [21]. In this lemma, an adjustable parameter is introduced which provides potential to reduce the conservatism without much computational complexity.

In this paper, a suitable LKF is constructed based on the delay and quadratic multiplication LKF, and the derivative of the LKF is estimated by the integral inequality method and a relaxed quadratic function negative-determination lemma is employed to obtain the asymptotic stability criteria of HNNs. Finally, a numerical example is given to demonstrate the advantages and effectiveness of the proposed method.

Notation: The notation $\mathbb{R}^n$ denotes the n -dimensional Euclidean space; $P > 0$ means that the matrix P is positive definite; I and 0 represent an appropriately dimensioned identity matrix and zero matrix respectively; $*$ stands for the symmetric term in the symmetric matrix; the transpose and the inverse of a matrix are denoted by the superscripts T and -1 ; $\text{Sym}\{X\} = X + X^T$.

PROBLEM FORMULATION

Consider the following Hopfield neural networks(HNNs):

$$\dot{y}(t) = -Ay(t) + Bg(y(t-\tau)) + u, \quad (1)$$

where z denotes the neuron state vector; $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T \in \mathbb{R}^n$ is a constant input vector; $A = \text{diag}\{a_1, a_2, \dots, a_n\} > 0$ is a diagonal matrix; B is the delayed connection weight matrix;

$g(y(\bullet)) = [g(y_1(\bullet)), g(y_2(\bullet)), \dots, g(y_n(\bullet))]^T \in \mathbb{R}^n$ is the neuron activation function; τ is the time delay.

Assumption 1: The neuron activation function in system (1) for $\forall x, y \in \mathbb{R}$ and $x \neq y$ satisfies the following condition:

$$0 \leq \frac{g_i(x) - g_i(y)}{x - y} \leq L_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

where $L_j (j = 1, 2, \dots, n)$ are positive constants.

Let $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$ be the equilibrium point of system (1). By the transformation $y(\bullet) = x(\bullet) - x^*$, we can simplify the equation and the HNNs (1) is rewritten as:

$$\dot{x}(t) = -Ax(t) + Bf(x(t-\tau)), \quad (3)$$

where

$$f_i(x_i(\bullet)) = g_i(x_i(\bullet) + x_i^*) - g_i(x_i^*), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

By Assumption (1) and (4), it is easy to verify that

$$0 \leq \frac{f_j(x_j)}{x_j} \leq L_j, \quad f_j(0) = 0, \quad \forall x_j \in \mathbb{R}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

The time-varying delay satisfies the following condition:

$$0 < \tau < h, \quad 0 < \dot{\tau} < \mu. \quad (5)$$

Lemma 1: Given a positive integer N , an positive definite symmetric matrix $R \in \mathbb{R}^n$, $M_i \in \mathbb{R}^{n \times m} (i = 0, 1, 2)$ and a vector $\zeta \in \mathbb{R}^m$, for any continuous differentiable function, the following inequality holds:

$$\int_a^\beta \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds \leq \sum_{k=0}^N [2\zeta_N^T \pi_N^T M_k \zeta + \frac{\beta - \alpha}{2k+1} \zeta_N^T M_k^T R^{-1} M_k \zeta],$$

where

$$\zeta_N = \begin{cases} [x^T(\beta) \ x^T(\alpha)]^T, & N = 0 \\ [x^T(\beta) \ x^T(\alpha) \ \frac{1}{\beta - \alpha} \Omega_0^T \dots \frac{1}{\beta - \alpha} \Omega_{N-1}^T]^T, & N > 0 \end{cases}$$

$$\pi_N(k) = \begin{cases} [I \ -I], & N = 0 \\ [I \ (-1)^{k+1} I \ \lambda_{Nk}^0 I \dots \lambda_{Nk}^{N-1} I], & N > 0 \end{cases}$$

$$\Omega_k = \int_a^\beta L_k(u) x(u) du$$

$$\lambda_{Nk}^i = \begin{cases} -(2i+1)(1-(-1)^{k+i}), & i \leq k \\ 0, & i \geq k+1 \end{cases}$$

$$L_k(s) = (-1)^k \sum_{l=0}^k \left[(-1)^l \binom{k}{l} \binom{k+l}{l} \right] \left(\frac{s-\alpha}{\beta-\alpha} \right)^l.$$

Lemma 2: For a quadratic function [21] $f(y) = a_2 y^2 + a_1 y + a_0$, $f(y) < 0$ holds for $y \in [\alpha, \beta]$ if the following holds for any given $\kappa \in [0, 1]$:

$$\begin{cases} f(\alpha) < 0 \\ f(\beta) < 0 \\ -\kappa^2 a_2 (\beta - \alpha)^2 + f(\alpha) < 0 \\ -(1 - \kappa)^2 a_2 (\beta - \alpha)^2 + f(\beta) < 0 \end{cases}.$$

Lemma 3: Assuming that [22] (5) holds, then

$$\int_{\alpha}^{\beta} [f_i(s) - f_i(\alpha)] ds \leq [\beta - \alpha] [f_i(\beta) - f_i(\alpha)], i = 1, 2, \dots, n.$$

ASYMPTOTIC STABILITY CRITERIA

In this section, a new delay-dependent asymptotic stability criterion for HNNs with time-varying delay is derived.

Theorem 1: Given a fixed $\kappa \in [0, 1]$, h, μ_1, μ_2 , system (3) is asymptotically stable if there exist symmetric matrix $P_i > 0 (i = 1, 2, 3)$, $Q_i > 0 (i = 1, 2, 3, 4)$, $R > 0$, matrix $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} > 0$, $S_i = \text{diag}\{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in}\} > 0 (i = 1, 2)$ and any matrix $M_{1i}, M_{2i} (i = 0, 1, 2)$, such that the following holds

$$\begin{bmatrix} \Upsilon(h, \mu_c) & hM_1^T \\ * & -h\hat{R} \end{bmatrix} < 0; \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \Upsilon(h, \mu_c) + \Upsilon(\kappa h, \mu_c) - \delta_1^2 a_2 h^2 & h\tilde{M}_1^T \\ * & -h\tilde{R}_1 \end{bmatrix} < 0, \quad (7)$$

where $l = 1, 2$; $c = 1, 2$; $h_1 = 0$; $h_2 = h$; $\mu_1 = 0$; $\mu_2 = \mu$, $\delta_1 = \kappa$; $\delta_2 = 1 - \kappa$; $\bar{\tau} = h - \tau$;

$$M_l = \text{col}\{M_{l0}, M_{l1}, M_{l2}\};$$

$$\tilde{M}_l = \text{col}\{M_l, (1 - \kappa)M_1, \kappa M_2\};$$

$$\tilde{R}_l = \text{diag}\{\hat{R}, (1 - \kappa)\hat{R}, \kappa\hat{R}\},$$

$$\hat{R} = \text{diag}\{R, 3R, 5R\};$$

$$e_i = [0_{n \times (i-1)n}, I, 0_{n \times (12-i)n}], i = 1, 2, \dots, 12;$$

$$e_s = -Ae_1 + Be_{11};$$

$$\Upsilon(\tau, \dot{\tau}) = \Upsilon_1(\tau, \dot{\tau}) + \Upsilon_2(\dot{\tau}) + \Upsilon_3(\dot{\tau}) + \sum_{i=4}^6 \Upsilon_i;$$

$$\begin{aligned} \Upsilon_1(\tau) = & \text{Sym}\{\Pi_{11}^T P_1 \Pi_{21}\} \\ & + \dot{\tau} \Pi_{12}^T P_2 \Pi_{12} + \tau \text{Sym}\{\Pi_{12}^T P_2 \Pi_{22}\} \\ & - \dot{\tau} \Pi_{13}^T P_3 \Pi_{13} + \bar{\tau} \text{Sym}\{\Pi_{13}^T P_3 \Pi_{23}\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Upsilon_2(\dot{\tau}) = & e_1^T Q_1 e_1 - (1 - \dot{\tau}) e_2^T Q_1 e_2 + \\ & + (1 - \dot{\tau}) e_2^T Q_2 e_2 - e_3^T Q_2 e_3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Upsilon_3(\dot{\tau}) = & \Pi_3^T Q_3 \Pi_3 - (1 - \dot{\tau}) \Pi_4^T Q_3 \Pi_4 \\ & + (1 - \dot{\tau}) \Pi_4^T Q_4 \Pi_4 - \Pi_5^T Q_4 \Pi_5; \end{aligned}$$

$$\Upsilon_4 = \text{Sym}\{e_{10}^T \Lambda e_s\};$$

$$\Upsilon_5 = h e_s^T R e_s + \sum_{k=0}^2 \text{Sym}\{g_1^T E_{1k}^T M_{1k} + g_2^T E_{1k}^T M_{2k}\};$$

$$\begin{aligned} \Upsilon_6 = & \text{Sym}\{e_{10}^T \Lambda e_s + e_1^T L S_1 e_{10} \\ & - e_{10}^T S_1 e_{10} + e_2^T L S_2 e_{11} - e_{11}^T S_2 e_{11}\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 = & \dot{\tau} N_1^T P_2 N_1 + \text{Sym}\{N_1^T P_2 \Pi_{22}\} \\ & - \dot{\tau} N_2^T P_3 N_2 + \text{Sym}\{N_2^T P_3 \Pi_{23}\}; \end{aligned}$$

$$d_1 = \text{col}\{e_1, e_2, e_3\};$$

$$d_2 = \text{col}\{e_4, e_5\}, \quad d_3 = \text{col}\{e_6, e_7\};$$

$$d_4 = \text{col}\{e_s, (1-\dot{\tau})e_8, e_9\};$$

$$d_5 = \text{col}\{e_1 - (1-\dot{\tau})e_2, e_1 - (1-\dot{\tau})e_4 - \dot{\tau}e_5\};$$

$$d_6 = \text{col}\{(1-\dot{\tau})e_2 - e_3, (1-\dot{\tau})e_2 - e_6 + \dot{\tau}e_7\};$$

$$\Pi_{11} = \text{col}\{d_1, \tau d_2, \bar{\tau} d_3\}, \quad \Pi_{21} = \text{col}\{d_4, d_5, d_6\};$$

$$\Pi_{12} = \text{col}\{d_1, \tau d_2\}, \quad \Pi_{22} = \text{col}\{d_4, d_5\};$$

$$\Pi_{13} = \text{col}\{d_1, \bar{\tau} d_3\}, \quad \Pi_{23} = \text{col}\{d_4, d_6\};$$

$$\Pi_3 = \text{col}\{e_s, e_1, e_{10}\}, \quad \Pi_4 = \text{col}\{e_8, e_2, e_{11}\};$$

$$\Pi_5 = \text{col}\{e_9, e_3, e_{12}\}, \quad E_{10} = [I, -I, 0, 0];$$

$$E_{11} = [I, I, -2I, 0], \quad E_{12} = [I, -I, 0, -6I];$$

$$g_1 = \text{col}\{e_2, e_3, e_6, -e_6 + 2e_7\};$$

$$g_2 = \text{col}\{e_1, e_2, e_4, -e_4 + 2e_5\};$$

$$N_1 = \text{col}\{0, 0, 0, d_2\}, \quad N_2 = \text{col}\{0, 0, 0, d_3\};$$

$$\xi(t) = \text{col}\{x(t), x(t-\tau), x(t-h),$$

$$\int_{t-\tau}^t \frac{x(s)}{\tau} ds, \int_{t-\tau}^t \int_{\theta}^t \frac{x(s)}{\tau^2} ds d\theta,$$

$$\int_{t-h}^{t-\tau} \frac{x(s)}{\bar{\tau}} ds, \int_{t-h}^{t-\tau} \int_{\theta}^{t-\tau} \frac{x(s)}{\bar{\tau}^2} ds d\theta$$

$$\dot{x}(t-\tau), \dot{x}(t-h),$$

$$f(x(t)), f(x(t-\tau)), f(x(t-h))\}.$$

Proof: Consider the following LKF candidate:

$$V(t) = \sum_{i=1}^5 V_i(t), \quad (8)$$

where

$$V_1(t) = \eta_1^T(t) P_1 \eta_1(t) + \tau \eta_2^T(t) P_2 \eta_2(t) + \\ + (h-\tau) \eta_3^T(t) P_3 \eta_3(t);$$

$$V_2(t) = \int_{t-\tau}^t x^T(s) Q_1 x(s) ds;$$

$$V_3(t) = \int_{t-\tau}^t \eta_2^T(s) Q_3 \eta_2(s) ds;$$

$$V_4(t) = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \int_0^{x_i} f_i(s) ds;$$

$$V_5(t) = \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds d\theta;$$

and

$$\eta_1(t) = \text{col}\{x(t), x(t-\tau), x(t-h),$$

$$\int_{t-\tau}^t \frac{x(s)}{\tau} ds, \int_{t-\tau}^t \int_{\theta}^t \frac{x(s)}{\tau^2} ds d\theta,$$

$$\int_{t-h}^{t-\tau} \frac{x(s)}{\bar{\tau}} ds, \int_{t-h}^{t-\tau} \int_{\theta}^{t-\tau} \frac{x(s)}{\bar{\tau}^2} ds d\theta\};$$

$$\eta_2(t) = \text{col}\{x(t), x(t-\tau), x(t-h),$$

$$\int_{t-\tau}^t \frac{x(s)}{\tau} ds, \int_{t-\tau}^t \int_{\theta}^t \frac{x(s)}{\tau^2} ds d\theta\};$$

$$\eta_3(t) = \text{col}\{x(t), x(t-\tau), x(t-h),$$

$$\int_{t-h}^{t-\tau} \frac{x(s)}{\bar{\tau}} ds, \int_{t-h}^{t-\tau} \int_{\theta}^{t-\tau} \frac{x(s)}{\bar{\tau}^2} ds d\theta\}$$

and $P_i > 0 (i = 1, 2, 3), \quad Q_i > 0 (i = 1, 2, 3, 4),$
 $R > 0, \quad \Lambda > 0$ which shows $V(t) \geq \varepsilon \|x\|^2$ for a
sufficient small $\varepsilon > 0$.

Then calculating the derivatives of $V(t)$
defined in (9) and the derivatives of
 $V_i(t) (i = 1, 2, \dots, 5)$ are given by

$$\dot{V}_1(t) = 2\eta_1^T(t) P_1 \dot{\eta}_1(t) + \dot{\tau} \eta_2^T(t) P_2 \eta_2(t) + \\ + 2\tau \eta_2^T(t) P_2 \dot{\eta}_2(t) - \dot{\tau} \eta_3^T(t) P_3 \eta_3(t) + \\ + 2\bar{\tau} \eta_3^T(t) P_3 \dot{\eta}_3(t) = \xi^T(t) \Upsilon_1(\tau, \dot{\tau}) \xi(t). \quad (9)$$

$$\dot{V}_2(t) = x^T(t) Q_1 x(t) - x^T(t-\tau) (Q_1 - Q_2)$$

$$x(t-\tau) - Q_2 x(t-h) = \xi^T(t) \{e_1^T Q_1 e_1 - e_2^T Q_1 e_2 \quad (10)$$

$$+ e_2^T Q_2 e_2 - e_3^T Q_2 e_3\} \xi(t) = \xi^T(t) \Upsilon_2(\dot{\tau}) \xi(t).$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_3(t) &= \eta_2^T(t)Q_3\eta_2(t) - \eta_2^T(t-\tau)(Q_3 - Q_4) \\ &\quad \eta_2(t-\tau) - \eta_2^T(t-h)Q_4\eta_2(t-h) \\ &= \xi^T(t)\{\Pi_3^T Q_3 \Pi_3 - \Pi_4^T Q_3 \Pi_4 \\ &\quad + \Pi_4^T Q_4 \Pi_4 - \Pi_5^T Q_4 \Pi_5\}\xi(t) \\ &= \xi^T(t)\Upsilon_3(\dot{\tau})\xi(t).\end{aligned}\quad (11)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_4(t) &= 2f^T(x(t))\Lambda\dot{x}(t) \\ &= \xi^T(t)\text{Sym}\{e_{10}^T\Lambda e_s\}\xi(t) \\ &= \xi^T(t)\Upsilon_4\dot{\xi}(t).\end{aligned}\quad (12)$$

$$\dot{V}_5(t) = h\dot{x}^T(t)R\dot{x}(t) - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)ds. \quad (13)$$

Based on lemma 1, $\int_{t-h}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)ds$ with $R > 0$ can be estimated as:

$$\begin{aligned}-\int_{t-h}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)ds &= -\int_{t-h}^{t-\tau} \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)ds - \\ &\quad -\int_{t-\tau}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)ds \leq \sum_{k=0}^2 [2\zeta_k^T(t)E_{1k}^T M_{1k}\zeta(t) \\ &\quad + \frac{\bar{\tau}}{2k+1}\xi^T(t)M_{1k}^T R^{-1}\tilde{M}_{1k}\xi(t)] \\ &\quad + \sum_{k=0}^2 [2\zeta_k^T(t)E_{2k}^T M_{2k}\zeta(t) \\ &\quad + \frac{\bar{\tau}}{2k+1}\xi^T(t)M_{2k}^T R^{-1}\tilde{M}_{2k}\xi(t)] \\ &= \xi^T(t)\left\{\sum_{k=0}^2 \text{Sym}\{g_1^T E_{1k}^T M_{1k} + g_2^T E_{2k}^T M_{2k}\} + \bar{\Upsilon}_5\right\}\xi(t).\end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}\zeta_1(t) &= \text{col}\{x(t-\tau), x(t-h), \frac{1}{\tau}\int_{t-h}^{t-\tau} x(s)ds, \\ &\quad -\frac{1}{\tau}\int_{t-h}^{t-\tau} x(s)ds + \frac{2}{\tau^2}\int_{t-h}^{t-\tau}\int_s^{t-\tau} x(s)dsdu\}; \\ \zeta_2(t) &= \text{col}\{x(t), x(t-\tau), \frac{1}{\tau}\int_{t-\tau}^t x(s)ds, \\ &\quad -\frac{1}{\tau}\int_{t-\tau}^t x(s)ds + \frac{2}{\tau^2}\int_{t-\tau}^t\int_s^t x(u)duds\}.\end{aligned}$$

Therefore,

$$\dot{V}_5(t) \leq \xi^T(t)\{\Upsilon_5 + \bar{\Upsilon}_5(\tau)\}\xi(t). \quad (14)$$

For matrices $S_i = \text{diag}\{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in}\} > 0$ ($i=1, 2$), the following hold by using lemma 3:

$$\begin{aligned}0 &\leq 2x^T(t)LS_1f(x(t)) - 2f^T(x(t))S_1f(x(t)) \\ &\quad + 2x^T(t-\tau)LS_2f(x(t-\tau)) \\ &\quad - 2f^T(x(t-\tau))S_2f(x(t-\tau)) \\ &= \xi^T(t)\Upsilon_6\xi(t).\end{aligned}\quad (15)$$

It follows from (10)–(16) that

$$\dot{V}(t) \leq \xi^T(t)(\Upsilon(\tau) + \bar{\Upsilon}_5)\xi(t) = \varpi(\tau). \quad (16)$$

It is found that $\varpi(\tau, \dot{\tau})$ is a quadratic function. Thus, based on lemma 2, the following holds:

$$\begin{cases} \varpi(0, 0) < 0 \\ \varpi(h, 0) < 0 \\ -\kappa^2 a_2 h^2 + \varpi(0, 0) < 0 \\ -(1-\kappa)^2 a_2 h^2 + \varpi(h, 0) < 0 \end{cases}; \quad (17)$$

$$\begin{cases} \varpi(0, \mu) < 0 \\ \varpi(h, \mu) < 0 \\ -\kappa^2 a_2 h^2 + \varpi(0, \mu) < 0 \\ -(1-\kappa)^2 a_2 h^2 + \varpi(h, \mu) < 0 \end{cases}. \quad (18)$$

It follows that (18), (19) $\Rightarrow$ (7), (8) by using Schur complement. This completes the proof.

NUMERICAL EXAMPLES

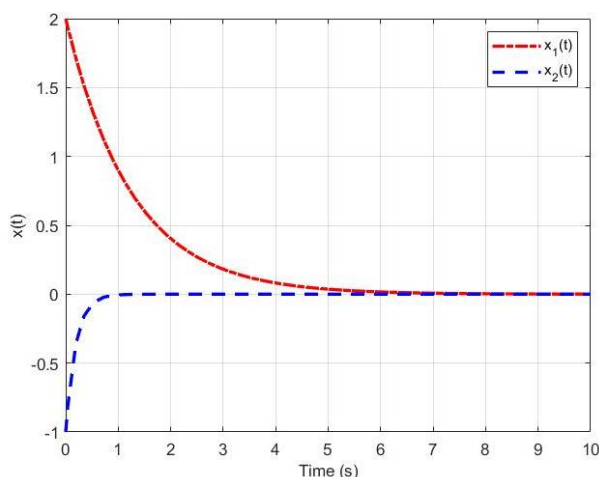
In this section, a numerical example is given to demonstrate the effectiveness and advantages of the proposed method.

Example 1: Consider the following HNN (3) with time-varying delay (6):

$$A = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 5.3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.9 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mu = 0.9.$$

By the Theorem 1 of this paper, the maximum delay h that guarantees the asymptotic stability of HNN (3) is 51.3012 while it is 14.660 in [8]. So our result is less conservative.



State trajectories of the system of Example 1
Траектории состояний системы примера 1

Setting

$$x(0) = \text{col}\{2, -1\} \quad \tau = 0.9 \sin t + 50.4012$$

$$f(x) = \text{col}\{\tanh(x_1(t)), \tanh(x_2(t))\}.$$

The responses of the HNN (3) with a time-varying delay when $\mu = 0.9, h = 51.3012$ are shown in the figure above. The result indicates that the system is stable at its equilibrium points, which verifies the effectiveness of the proposed method.

CONCLUSION

In this paper, an augmented functional is constructed based on the delay and quadratic multiplicative functional, and the derivative of the functional is defined by the free-weight matrix integral inequality. We choose the relaxed quadratic function negative-determination lemma to deal with the quadratic function and obtain the stability criterion. Finally, a numerical example is given to prove the effectiveness and advantages of the proposed method in this paper.

References

1. Ma Shuo, Kang Yanmei. Exponential synchronization of delayed neutral-type neural networks with Lévy noise under non-Lipschitz condition. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2018;57:372-387. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.10.012>.
2. Chen Can, Kang Yanmei. Dynamics of a stochastic multi-strain SIS epidemic model driven by Lévy noise. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2017;42:379-395. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2016.06.012>.
3. Farrell J. A., Michel A. N. A synthesis procedure for Hopfield's continuous-time associative memory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1990;37(7):877-884. <https://doi.org/10.1109/31.55063>.
4. Guan Zhi-Hong, Chen Guanrong. On delayed impulsive Hopfield neural networks. *Neural Networks*. 1999;12(2):273-280. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(98\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(98)00133-6).
5. Shin Yu-Hyun, Baek Seung Jun. Hopfield-type neural ordinary differential equation for robust machine learning. *Pattern Recognition Letters*. 2021;152:180-187. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.10.008>.
6. Sun Junwei, Xiao Xiao, Yang Qinfei, Liu Peng, Wang Yanfeng. Memristor-based Hopfield network circuit for recognition and sequencing application. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 2021;134:153698. <https://doi.org/10.1016/j.aue.2021.153698>.
7. Mou Shaoshuai, Gao Huijun, Lam James, Qiang Wenyi. A new criterion of delay-dependent asymptotic stability for Hopfield neural networks with time delay. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2008;19(3):532-535. <https://doi.org/10.1109/TNN.2007.912593>.
8. Liu Fang, He Yong, Li Yong, Dong Mi. Novel delay-dependent robust stability criteria of hopfield neural networks with time-varying delay. In: *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2017.8282941>.
9. Xu Shengyuan, Lam James, Ho D. W. C. A new LMI condition for delay-dependent asymptotic stability of delayed Hopfield neural networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2006;53(3):230-234. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2005.857764>.
10. Qiang Zhang, Xu Xiaopeng, Wei Jin. Delay-dependent global stability results for delayed Hopfield neural networks. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2007;34(2):662-668. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.03.073>.
11. Yang Degang, Liao Xiaofeng, Chen Yong, Guo Songtao, Wang Hui. New delay-dependent global asymptotic stability criteria of delayed Hopfield neural networks. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 2008;9(5):1894-1904. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2007.06.008>.
12. Zhang Fen, Zhang Yanbang. Novel delay-dependent stability criteria for delayed neural networks. In: *2nd Inter-*

national Conference on Intelligent Control and Information Processing. 25–28 July 2011, Harbin. Harbin: IEEE; 2011, p. 702–707. <https://doi.org/10.1109/ICICIP.2011.6008340>.

13. Mahto S. C., Ghosh S., Saket R. K., Nagar S. K. Stability analysis of delayed neural network using new delay-product based functionals. *Neurocomputing*. 2020;417:106–113. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.021>.

14. He Yong, Wu Min, She Jin-Hua, Liu Guo-Ping. Delay-dependent robust stability criteria for uncertain neutral systems with mixed delays. *Systems & Control Letters*. 2004;51(1):57–65. [https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(03\)00207-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(03)00207-X).

15. Gu Kebin, Kharitonov V. L., Chen Jie. Stability of time-delay systems. Springer Science & Business Media, 2003. 367 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0039-0>.

16. Seuret A., Gouaisbaut F. Wirtinger-based integral inequality: application to time-delay systems. *Automatica*. 2013;49(9):2860–2866. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.05.030>.

17. Seuret A., Gouaisbaut F. Hierarchy of LMI conditions for the stability analysis of time-delay systems. *Systems & Control Letters*. 2015;81:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.03.007>.

18. Park PooGyeon, Lee Won Il, Lee Seok Young. Auxiliary function-based integral inequalities for quadratic functions and their applications to time-delay systems. *Journal*

of the Franklin Institute. 2015;352(4):1378–1396. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2015.01.004>.

19. Zeng Hong-Bing, Liu Xiao-Gui, Wang Wei. A generalized free-matrix-based integral inequality for stability analysis of time-varying delay systems *Applied Mathematics and Computation*. 2019;354:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.009>.

20. Kim Jin-Hoon. Further improvement of Jensen inequality and application to stability of time-delayed systems. *Automatica*. 2016;64:121–125. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.08.025>.

21. Zhang Chuan-Ke, Long Fei, He Yong, Yao Wei, Jiang Lin, Wu Min. A relaxed quadratic function negative-determination lemma and its application to time-delay systems. *Automatica*. 2020;113:108764. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108764>.

22. Zhang Jinhui, Shi Peng, Qiu Jiqing. Novel robust stability criteria for uncertain stochastic Hopfield neural networks with time-varying delays. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 2007;8(4):1349–1357. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2006.06.010>.

23. Karamov D. N., Sidorov D. N., Muftahov I. R., Zhukov A. V., Liu F. Optimization of isolated power systems with renewables and storage batteries based on nonlinear Volterra models for the specially protected natural area of lake Baikal. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1847(1):12037.

Список источников

1. Ma Shuo, Kang Yanmei. Exponential synchronization of delayed neutral-type neural networks with Lévy noise under non-Lipschitz condition // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2018. Vol. 57. P. 372–387. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.10.012>.

2. Chen Can, Kang Yanmei. Dynamics of a stochastic multi-strain SIS epidemic model driven by Lévy noise // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2017. Vol. 42. P. 379–395. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2016.06.012>.

3. Farrell J. A., Michel A. N. A synthesis procedure for Hopfield's continuous-time associative memory // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1990. Vol. 37. Iss. 7. P. 877–884. <https://doi.org/10.1109/31.55063>.

4. Guan Zhi-Hong, Chen Guanrong. On delayed impulsive Hopfield neural networks // *Neural Networks*. 1999. Vol. 12. Iss. 2. P. 273–280. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(98\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(98)00133-6).

5. Shin Yu-Hyun, Baek Seung Jun. Hopfield-type neural ordinary differential equation for robust machine learning // *Pattern Recognition Letters*. 2021. Vol. 152. P. 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.10.008>.

6. Sun Junwei, Xiao Xiao, Yang Qinfei, Liu Peng, Wang Yanfeng. Memristor-based Hopfield network circuit for recognition and sequencing application // *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 2021. Vol. 134. P. 153698. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153698>.

7. Mou Shaoshuai, Gao Huijun, Lam James, Qiang Wenyi. A new criterion of delay-dependent asymptotic stability for Hopfield neural networks with time delay // *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2008. Vol. 19. Iss. 3. P. 532–535.

<https://doi.org/10.1109/TNN.2007.912593>.

8. Liu Fang, He Yong, Li Yong, Dong Mi. Novel delay-dependent robust stability criteria of hopfield neural networks with time-varying delay // *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2017.8282941>.

9. Xu Shengyuan, Lam James, Ho D. W. C. A new LMI condition for delay-dependent asymptotic stability of delayed Hopfield neural networks // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2006. Vol. 53. Iss. 3. P. 230–234. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2005.857764>.

10. Qiang Zhang, Xu Xiaopeng Wei Jin. Delay-dependent global stability results for delayed Hopfield neural networks // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2007. Vol. 34. Iss. 2. P. 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.03.073>.

11. Yang Degang, Liao Xiaofeng, Chen Yong, Guo Songtao, Wang Hui. New delay-dependent global asymptotic stability criteria of delayed Hopfield neural networks // *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 2008. Vol. 9. Iss. 5. P. 1894–1904. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2007.06.008>.

12. Zhang Fen, Zhang Yanbang. Novel delay-dependent stability criteria for delayed neural networks // *2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing* (Harbin, 25–28 July 2011). Harbin: IEEE, 2011. P. 702–707. <https://doi.org/10.1109/ICICIP.2011.6008340>.

13. Mahto S. C., Ghosh S., Saket R. K., Nagar S. K. Stability analysis of delayed neural network using new delay-product based functionals // *Neurocomputing*. 2020. Vol. 417. P. 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.021>.

14. He Yong, Wu Min, She Jin-Hua, Liu Guo-Ping. Delay-dependent robust stability criteria for uncertain neutral systems with mixed delays // Systems & Control Letters. 2004. Vol. 51. Iss. 1. P. 57–65. [https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(03\)00207-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(03)00207-X).
15. Gu Keqin, Kharitonov V. L., Chen Jie. Stability of time-delay systems. Springer Science & Business Media; 2003, 367 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0039-0>.
16. Seuret A., Gouaisbaut F. Wirtinger-based integral inequality: application to time-delay systems // Automatica. 2013. Vol. 49. Iss. 9. P. 2860–2866. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.05.030>.
17. Seuret A., Gouaisbaut F. Hierarchy of LMI conditions for the stability analysis of time-delay systems // Systems & Control Letters. 2015. Vol. 81. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.03.007>.
18. Park PooGyeon, Lee Won Il, Lee Seok Young. Auxiliary function-based integral inequalities for quadratic functions and their applications to time-delay systems // Journal of the Franklin Institute. 2015. Vol. 352. Iss. 4. P. 1378–1396. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2015.01.004>.
19. Zeng Hong-Bing, Liu Xiao-Gui, Wang Wei. A generalized free-matrix-based integral inequality for stability

- analysis of time-varying delay systems // Applied Mathematics and Computation. 2019. Vol. 354. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.009>.
20. Kim Jin-Hoon. Further improvement of Jensen inequality and application to stability of time-delayed systems // Automatica. 2016. Vol. 64. P. 121–125. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.08.025>.
21. Zhang Chuan-Ke, Long Fei, He Yong, Yao Wei, Jiang Lin, Wu Min. A relaxed quadratic function negative-determination lemma and its application to time-delay systems // Automatica. 2020. Vol. 113. P. 108764. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108764>.
22. Zhang Jinhui, Shi Peng, Qiu Jiqing. Novel robust stability criteria for uncertain stochastic Hopfield neural networks with time-varying delays // Nonlinear Analysis: Real World Applications. 2007. Vol. 8. Iss. 4. P. 1349–1357. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2006.06.010>.
23. Karamov D. N., Sidorov D. N., Muftahov I. R., Zhukov A. V., Liu F. Optimization of isolated power systems with renewables and storage batteries based on nonlinear Volterra models for the specially protected natural area of lake Baikal // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1847. Iss.1. P. 12037.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Weiru Guo,
PhD student,
School of Automation
Central South University
Changsha 410083, Minzhu Building, People's
Republic of China

Fang Liu,
full professor,
School of Automation
Central South University
Changsha 410083, Minzhu Building, People's
Republic of China

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 08.11.2021; approved after reviewing 02.12.2021; accepted for publication 29.12.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вэйжу Го,
аспирант,
Школа автоматизации,
Центральный Южный университет,
410083, г. Чанша, зд. Миньчжу,
Китайская Народная Республика

Фан Лю,
профессор,
Школа автоматизации,
Центральный Южный университет,
410083, г. Чанша, зд. Миньчжу,
Китайская Народная Республика

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.11.2021; одобрена после рецензирования 02.12.2021; принята к публикации 29.12.2021.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 620.4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-762-772>

Определение средних удельных капиталовложений парогазовых установок с газовыми турбинами в диапазоне мощностей 30–125 МВт, введенными в эксплуатацию на российских тепловых электрических станциях в период 2015–2020 гг. и сравнительный анализ с данными периода 2010–2014 гг.

Елена Леонидовна Степанова^{1✉}, Анатолий Петрович Овчинников²^{1,2}Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия¹elstep47@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2726-5397>²bolshayaptica14@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9506-9267>

Резюме. Цель – нахождение средних удельных капитальных вложений и расходов топлива на отпуск электрической и тепловой энергии для введенных в эксплуатацию блоков парогазовых установок на российских тепловых электрических станциях в период с 2015 по 2020 г., содержащих в своем составе газовые турбины в диапазоне единичных электрических мощностей 30–125 МВт. В работе использовались общепринятые методы расчета средних удельных капитальных вложений и расходов топлива на отпуск электрической и тепловой энергии для энергооборудования тепловых электростанций. Для выполнения исследований объемов ввода газовых турбин в составе блока парогазовых установок турбины были классифицированы на три группы по электрической мощности: 30–59 МВт, 60–99 МВт, 100–125 МВт. Проанализированы объемы ввода в эксплуатацию энергетических газовых турбин, работающих в составе блоков парогазовых установок, на российских тепловых электрических станциях в период с 2015 по 2020 г. Вычислены средние удельные капитальные вложения в парогазовые установки, содержащие в своем составе газовые турбины в диапазоне единичных электрических мощностей 30–125 МВт, а также средние удельные расходы топлива парогазовых установок на отпуск электрической и тепловой видов энергии. Расчеты выполнены для каждого блока парогазовых установок, входящего в состав тепловых электрических станций с разбивкой по семи объединенным энергетическим системам Российской Федерации. Приведены результаты сравнения количественных вводов газовых турбин в период с 2010 г. до экономического кризиса 2014 г. и в период после 2014 г. до настоящего времени, которые показывают снижение вводов в эксплуатацию газовых турбин ~ в 2,5 раза. Проведена предварительная оценка увеличения средних удельных капитальных вложений в парогазовые установки, в составе которых имелись одинаковые по электрической мощности газовые турбины.

Ключевые слова: газовые турбины, парогазовые установки, тепловые электрические станции, удельные капиталовложения, удельные расходы условного топлива

Благодарности: В Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005, рег. № AAAA-A21-121012190004-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2025 гг.

Для цитирования: Степанова Е. Л., Овчинников А. П. Определение средних удельных капиталовложений парогазовых установок с газовыми турбинами в диапазоне мощностей 30–125 МВт, введенными в эксплуатацию на российских тепловых электрических станциях в период 2015–2020 гг. и сравнительный анализ с данными периода 2010–2014 гг. // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 762–772. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-762-772>.

Determination of average relative capital investment of 30–125 MW combined-cycle plants commissioned at Russian thermal power plants in 2015–2020. Comparative analysis with data obtained in 2010–2014

Elena L. Stepanova^{1✉}, Anatoly P. Ovchinnikov²

^{1,2}Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

¹elstep47@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2726-5397>

²bolshayaptica14@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9506-9267>

Annotation. The present work examines average relative capital investment and fuel consumption for electric and thermal energy supply of the combined-cycle plants having 30–125 MW gas turbines commissioned at Russian thermal power plants in 2015–2020. In this work, we used general calculation methods of average relative capital investments and fuel consumption for the electrical and thermal energy supply using power equipment of thermal power plants. To assess the scope of commissioning gas turbines incorporated into the combined-cycle plants, they were classified into three groups by electrical power: 30–59 MW, 60–99 MW and 100–125 MW. The scope of commissioning gas turbines incorporated into the Russian combined-cycle plants in 2015–2020 was analysed. The average relative capital investment in combined-cycle plants having 30–125 MW gas turbines, as well as the average specific fuel consumption for the electrical and thermal energy supply, were calculated. The calculations were carried out for each part of combined-cycle plants integrated into thermal power plants with a breakdown by seven Unified Energy Systems of Russia. The quantitative commissioning of gas turbines is compared for the periods from 2010 to the economic crisis of 2014 and after 2014 to the present: a ~2.5-fold decrease is demonstrated. A preliminary evaluation of the increase in average relative capital investment in combined-cycle plants having gas turbines of the same electric power was performed.

Keywords: gas turbines, combined cycle gas turbines, thermal power plants, specific capital investment, specific consumption of fuel equivalent

Acknowledgments: the research conducted at Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences was carried out within the framework of the project of the state assignment (No. FWEU-2021-0005, reg. no. AAAA-A21-121012190004-5) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021–2025.

For citation: Stepanova E. L., Ovchinnikov A. P. Determination of average relative capital investment of 30–125 MW combined-cycle plants commissioned at Russian thermal power plants in 2015–2020. Comparative analysis with data obtained in 2010–2014. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):762–772. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-762-772>.

ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинные установки (ГТУ), работающие в составе парогазовых установок (ПГУ) или эксплуатируемые как отдельное энергетическое оборудование, активно применяются в энергетике как в России, так и в других странах. ГТУ обладают определенными преимуществами по сравнению с паротурбинными установками (ПТУ), в которых паровая турбина характеризуется более высокой надежностью и большим сроком эксплуатации, чем газовая турбина; при производстве парового котла и паровой турбины используются менее дефицитные материалы, чем при изготовлении газовой турбины. Для ГТУ тре-

буются меньшие сроки строительства и ввода в эксплуатацию, им характерны компактность, более низкие эксплуатационные затраты и себестоимость продукции, более высокий коэффициент полезного действия при работе в составе ПГУ [1–5]. ГТУ могут входить как в состав тепловых электрических станций (ТЭС), так и эксплуатироваться как отдельное энергетическое производство, работая на собственные нужды или общие электрические и тепловые сети. ГТУ часто эксплуатируются в режиме когенерации, обеспечения потребителей электрической и тепловой энергией [6–8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Процент ГТУ и ПГУ в настоящее время в единой энергетической системе России (ЕЭС России) достаточно мал – порядка 9% от общего парка ТЭС ЕЭС России. Но стоит отметить, что в последнее десятилетие в российской энергетике взят курс на увеличение ввода энергетических газовых турбин в составе ГТУ и ПГУ. Одними из основных причин являются меньшие по сравнению с ПТУ капитальные вложения в модернизацию или строительство, сниженные практически вдвое сроки строительства, более высокая экологичность и т.д. Поскольку долгое время в России (в том числе и в СССР) по ряду причин ГТУ и ПГУ производились и эксплуатировались в ограниченном количестве, даже несмотря на целесообразность их широкого применения, сейчас в стране наблюдается дефицит мощностей по выпуску газовых турбин необходимой номенклатуры [9–29]. Поэтому в основном производство энергетических газовых турбин осуществляется на совместных предприятиях с участием иностранных партнеров. Типовые характеристики введенных в эксплуатацию за последнее де-

сятилетие газовых турбин представлены в табл. 1.

В настоящей работе была поставлена задача исследовать введенные в эксплуатацию на российских ТЭС газовые турбины электрической мощностью от 30 МВт до 125 МВт в период с 2015 по 2020 г. (эксплуатируемые в составе блока ПГУ). Целью данных исследований являлось определение «средних удельных капитальных вложений и средних удельных расходов топлива на отпуск электрической и тепловой энергии для введенных за этот период блоков ПГУ по объединенным энергетическим системам (ОЭС) Российской Федерации (РФ), а также их анализ и сравнение с данными по вводам в эксплуатацию газовых турбин» [9] за период с 2010 по 2014 г. Полученные данные позволяют предварительно оценить энергетическую и экономическую эффективности работы и темпы ввода газотурбинного оборудования на российских ТЭС с учетом климатических условий регионов, а так же эксплуатационных особенностей некоторых электростанций. Кроме того, результаты данной работы могут быть использованы при проведении прогнозной оценки потребности на ближайшие годы во

Таблица 1. Типовые характеристики газовых турбин
Table 1. Typical characteristics of gas turbines

Характеристики	Производитель									
	Ansaldo Energia	General Electric						Сатурн	Siemens	Rolls-Royce
Тип газовой турбины	V64.3A	PG6111FA	LM2500+G4 DLE	PG 9171 E	LM6000 PF Sprint	MS6001B (PG6581)	LMS 100	ГТЭ-110	SGT-800	Trent-60
Частота вращения ротора, Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Мощность ГТУ*, МВт	67	77	30	123	45	44	100	110	45	60
КПД ГТУ/ПГУ**, %	35,95/53,3	35,5/55,2	38,6/50	33,8/51	41/57	35/50	42/53	36/52	37/52,6	41,3/52
Температура газа на входе, °C	1315	1327	1176	1124	1243	1140	1380	1210	1230	1288
Температура газа на выходе, °C	588	603	529	538	449	544	415	517	538	425
Степень сжатия	16,1	16–17	20	12,3	30	17	–	14,7	19	–

*ГТУ – газотурбинные установки; **ПГУ – парогазовые установки.

вводе газовых турбин в диапазоне единичных мощностей 30–125 МВт.

В работе использовались данные, полученные с официальных сайтов генерирующих энергетических компаний (годовые отчеты), регионов РФ, официальных документов и проектов стратегии развития энергетики РФ. На ее основе рассчитывались «средние удельные капитальные вложения в ПГУ, в составе которых имеются газовые турбины в диапазоне единичных электрических мощностей 30–125 МВт, а также средние удельные расходы топлива ПГУ на отпуск электрической и тепловой энергии» [9]. При определении удельных расходов топлива на производство электроэнергии и тепла использовался метод ОРГРЭС (Трест по организации и рационализации районных электростанций и сетей), в соответствии с которым суммарный расход топлива энергоустановки, осуществляющей комбинированное производство электроэнергии и тепла, распределяется между этими видами энергии пропорционально отношению расхода при раздельном

производстве определенного вида энергии (электроэнергии на КЭС, тепла в котельной) к суммарному расходу топлива раздельными производствами. При этом за счет комбинированного производства сокращаются как удельный расход топлива на электроэнергию, так и удельный расход на тепло. Следует отметить, что при «расчете удельных капитальных вложений в ПГУ и ГТУ» [9] использовался среднегодовой курс доллара за период с 2015 по 2020 г. (после значительного скачка курса доллара в РФ в 2014 г.).

Как показал анализ данных по вводам энергетических газовых турбин, за период с 2015 г. до 2020 г. на территории РФ введены в эксплуатацию 36 газовых турбин в диапазоне единичных электрических мощностей 30–125 МВт³⁻¹³. Для более удобного представления данных «газовые турбины классифицированы по электрической мощности на следующие группы: 30–59 МВт, 60–99 МВт, 100–125 МВт» [9]. Распределение вводов газовых турбин на ТЭС семи ОЭС представлено в табл. 2.

³ Прогнозный баланс развития электроэнергетики на период 2009–2015 гг. и на 2020 г. // Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике [Электронный ресурс]. URL: <http://www.e-apbe.ru/5years/> (25.06.2021).

⁴ Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики России до 2020 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.02.08 № 215-р // Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике [Электронный ресурс]. URL: <http://www.e-apbe.ru/scheme/> (13.07.2021).

⁵ Сценарные условия развития электроэнергетики на период до 2030 года // Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике [Электронный ресурс]. URL: <http://www.e-apbe.ru/5years/> (14.07.2021).

⁶ О модернизации генерирующих объектов тепловых электростанций. Постановление от 25 января 2019 года № 43 // Распоряжение Правительства Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/35546/> (14.07.2021).

⁷ Проект энергетической стратегии России на период до 2035 года // Министерство энергетики Российской Федерации (2014 г.) [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (14.07.2021).

⁸ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2015 году // Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2016/tech-disc2016ups/> (14.07.2021).

⁹ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2016 году // Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2017/tech-disc2017ups/> (14.07.2021).

¹⁰ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2017 году // Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2018/tech-disc2018ups/> (15.07.2021).

¹¹ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2018 году // Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2019/tech-disc2019ups/> (15.07.2021).

¹² Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году // Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2020/tech-disc2020ups/> (15.07.2021).

¹³ Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 году // Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2021/tech-disc2021ups/> (16.07.2021).

Таблица 2. Распределение вводов газовых турбин в период с 2015 г. до 2020 г.**Table 2.** Distribution of gas turbine commissioning in the period from 2015 to 2020

Объединенные энергетические системы Российской Федерации	Количество введенных в эксплуатацию газовых турбин, шт.	Количественное распределение газовых турбин по диапазонам электрических мощностей, МВт		
		30–59	60–99	100–125
ОЭС* Северо-Запада	6	2	4	–
ОЭС Центра	3	–	3	–
ОЭС Средней Волги	4	–	3	1
ОЭС Урала	10	–	10	–
ОЭС Сибири	1	1	–	–
ОЭС Востока	11	10	1	–
ОЭС Юга	1	–	1	–
ИТОГО:	36	13	22	1

*ОЭС – объединенные энергетические системы.

Больше всего введено в эксплуатацию газовых турбин электрической мощностью 60–99 МВт (см. табл. 1). Среди рассматриваемых ОЭС большее количество газовых турбин введено в эксплуатацию в ОЭС Урала и Востока – 10 и 11 турбин, соответственно. В табл. 3 приведены технико-экономические показатели для трех групп диапазонов электрических мощностей, введенных на российских ТЭС, газовых турбин и работающих в составе блоков ПГУ с распределением по ОЭС.

За период с 2015 г. по 2020 г. на электростанциях ОЭС Северо-Запада введены 4 газовые турбины электрической мощностью 66 МВт, 2 газовые турбины ГТ-50 электрической мощностью 50 МВт каждая. Все газовые турбины установлены на ТЭЦ. ПГУ, введенные на ТЭС ОЭС Центра имеют электрическую мощность 125 МВт. Турбинами оборудованы ГТЭС и ТЭЦ. ГТЭС в г. Щербинка даст возможность восполнить дефицит тепловой мощности в районах Щербинка и Южное Бутово, а также на прилегающих к ним территориях. Реконструирована и введена в эксплуатацию ГТУ на ТЭЦ-1 Северо-Западного района г. Курска. Следует отметить, что на ТЭС ОЭС Центра несколько ниже значение средних удельных капитальных вложений в блоки ПГУ с газовыми турбинами электрических мощностей 60–99 МВт по сравнению с дан-

ными по блокам ПГУ ОЭС Северо-Запада. Это объясняется вводами энергетических газовых турбин на ранее построенных электростанциях ОЭС Центра, где имелись «помещения для монтажа генерирующего оборудования и необходимая инфраструктура (в частности, система топливоснабжения, система технического водоснабжения, электрические подстанции и различные распределительные устройства)» [9]. Как показано в табл. 1 и 2, на электростанциях ОЭС Средней Волги введены блоки ПГУ с энергетическими газовыми турбинами следующих диапазонов электрических мощностей: 60–99 МВт и 100–125 МВт. Вводы газотурбинного оборудования в эксплуатацию производились на Казанской ТЭЦ-1, построенной в начале XX в. Поэтому необходимо было «реконструировать помещения для установки генерирующего оборудования и соответствующей инфраструктуры, этим можно объяснить более высокие показатели средних удельных капитальных вложений в строительство блоков ПГУ ОЭС Средней Волги, чем показатели блоков ПГУ ОЭС Центра» [9]. На ТЭС ОЭС Урала был осуществлен ввод газовых турбин электрических мощностей 60–99 МВт. Значение средних удельных капитальных вложений в строительство блоков ПГУ ОЭС Урала выше по сравнению со значениями средних удельных капитальных

Таблица 3. Техничко-экономические показатели парогазовых установок, включающих в свой состав газовые турбины в трех диапазонах единичных мощностей
Table 3. Technical and economic indicators of combined cycle gas turbine plants that include gas turbines in the three ranges of unit capacities

Основные показатели	Диапазон электрических мощностей парогазовых установок, работающих в составе блока парогазовых установок, МВт		
	30–59	60–99	100–125
ОЭС* Северо-Запада			
Средние удельные капитальные вложения в парогазовые установки, долл/кВт	1450,8	1571,6	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, г у.т./кВт·ч	251,5	250,2	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг у.т./ГДж (кг у.т./Гкал)	36,3 (151,8)	35,1 (147,1)	–
ОЭС Центра			
Средние удельные капитальные вложения в парогазовые установки, долл/кВт	–	1290,5	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, г у.т./кВт·ч:	–	270,0	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг у.т./ГДж (кг у.т./Гкал)	–	35,7 (149,6)	–
ОЭС Средней Волги			
Средние удельные капитальные вложения в парогазовые установки, долл/кВт	–	1595,9	1691,6
Средний удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, г у.т./кВт·ч	–	265,2	261,2
Средний удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг у.т./ГДж (кг у.т./Гкал)	–	35,8 (149,5)	34,7 (145,1)
ОЭС Урала			
Средние удельные капитальные вложения в парогазовые установки, долл/кВт	–	1902,7	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, г у.т./кВт·ч:	–	263,3	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг у.т./ГДж (кг у.т./Гкал)	–	35,4 (148,3)	–
ОЭС Сибири			
Средние удельные капитальные вложения в парогазовые установки, долл/кВт	2040,2	–	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, г у.т./кВт·ч	249,1	–	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг у.т./ГДж (кг у.т./Гкал)	38,1 (159,5)	–	–
ОЭС Востока			
Средние удельные капитальные вложения, долл/кВт: – парогазовые установки – газотурбинные установки	1150,5	1751	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, г у.т./кВт·ч:	262,0	259,5	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг у.т./ГДж (кг у.т./Гкал)	34,7 (145,4)	35,0 (146,5)	–
ОЭС Юга			
Средние удельные капиталовложения в строительство парогазовых установок, долл/кВт	–	1751,0	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, г у.т./кВт·ч:	–	259,0	–
Средний удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг у.т./ГДж (кг у.т./Гкал)	–	34,9 (146,1)	–

*ОЭС – объединенные энергетические системы.

вложений блоков ПГУ ранее рассмотренных ОЭС. Во-первых, сказалось региональное расположение ТЭС. Во-вторых, ввод блоков ПГУ в эксплуатацию осуществлялся на электростанциях, построенных в 40–60 гг. прошлого столетия, таких как Уфимская ТЭЦ-2, Уфимская ТЭЦ-3, Салаватская ТЭЦ, Пермская ТЭЦ-9, что потребовало изменения некоторых систем электростанций. На ТЭС ОЭС Сибири в рассматриваемый период времени был завершен ввод блока ПГУ-90 Омской ТЭЦ-3. Данная ПГУ имеет в своем составе газовые турбины единичной электрической мощностью 30 МВт. Из-за определенных сложностей строительства в регионах Сибири, а также высокой стоимости вводимого в эксплуатацию газотурбинного оборудования, на данной электростанции средние удельные капитальные вложения в блок ПГУ имеют достаточно высокое значение. На ТЭС ОЭС Востока в период с 2015 по 2020 г. введено в эксплуатацию 11 энергетических газовых турбин. Следует отметить, что для ТЭС ОЭС Востока в табл. 2 в диапазоне электрических мощностей газовых турбин 30–59 МВт показано значение средних удельных капитальных вложений в строительство ГТУ, так как там осуществлялся ввод именно ГТУ, не входящих в состав блока ПГУ. Этот факт объясняет более низкие удельные капитальные вложения. На Волгоградской ТЭЦ-2 ОЭС Юга был осуществлен ввод блока ПГУ, в состав которой входит энергетическая газовая турбина в диапазоне электрических мощностей 60–99 МВт.

Ранее в статье [9] авторами приводилось описание исследований «объемов ввода на российских ТЭС энергетических газовых турбин в диапазоне единичных электрических мощностей 30–125 МВт, работающих в составе блоков ПГУ в период с 2010 по 2014 г. (до значительного скачка курса доллара в РФ)». В указанном литературном источнике ставилась задача «расчета средних удельных капитальных вложений и средних удельных расходов топлива на отпуск электрической и тепловой энергии для введенных за эти годы блоков ПГУ по ОЭС РФ». Настоящая работа является продолжением исследования. Это позволяет сравнить вводы газовых турбин в период с 2010 г. до экономического кризиса 2014 г. и в период после 2014 г. до настоящего времени. В табл. 4 приведены вводы газовых турбин за период с 2010 по 2014 г.

Как видно из табл. 2 и 4, количество введенных в эксплуатацию газовых турбин в период после экономического кризиса 2014 г. равно 36 единицам оборудования, что почти в 2,5 раза меньше по сравнению с периодом 2010–2014 гг. Увеличение средних удельных капитальных вложений в строительство блоков ПГУ, в составе которых имеются одинаковые по электрической мощности газовые турбины, введенные в эксплуатацию в период 2010–2014 гг. и в период 2015–2020 гг., в среднем составило: для ОЭС Северо-Запада – порядка 8%, для ОЭС Центра – 0,3%, для ОЭС Средней Волги – 0,5%, для ОЭС Урала – 1%, для ОЭС Востока – 36%, для ОЭС Юга –

Таблица 4. Распределение вводов газовых турбин в период с 2010 по 2014 г.

Table 4. Distribution of gas turbine commissioning in the period from 2010 to 2014

Объединенные энергетические системы Российской Федерации	Количество введенных в эксплуатацию газовых турбин, шт.	Количественное распределение газовых турбин по диапазонам электрических мощностей, МВт		
		30–59	60–99	100–125
ОЭС* Северо-Запада	8	–	8	–
ОЭС Центра	23	19	2	2
ОЭС Средней Волги	9	2	7	–
ОЭС Урала	16	12	4	–
ОЭС Сибири	2	2	–	–
ОЭС Востока	8	8	–	–
ОЭС Юга	17	9	8	–
ИТОГО:	83	52	29	2

*ОЭС – объединенные энергетические системы.

6%. В целом незначительное увеличение средних удельных капитальных вложений в строительство блоков ПГУ, кроме ввода ГТУ на электростанции ОЭС Востока, объясняется тем, что реализация многих проектов началась еще в период до 2014 г., но из-за экономической нестабильности вводы газовых турбин были перенесены на более поздний срок⁵⁻⁷.

В результате анализа данных сделаны следующие выводы. Практически все вводы газотурбинного оборудования на электростанциях ОЭС в период 2015–2020 гг., в отличие от периода 2010–2014 гг., осуществлялись на ТЭЦ, отпускающих потребителям как электрическую, так и тепловую энергию. Процесс «комбинированной выработки энергии обеспечивает невысокие значения средних удельных расходов топлива на отпуск электрической и тепловой энергии введенных за эти годы блоков ПГУ» [9]. Вводимые в эксплуатацию энергетические газовые турбины как в период 2010–2014 гг., так и в 2015–2020 гг., в основном зарубежного производства, что подтверждает острую необходимость разработки отечественных газовых турбин электрической мощностью 30–125 МВт, которые по своим энергетическим и экономическим характеристикам могли бы составить конкуренцию зарубежным производителям газовых турбин. В целом за второй период по ОЭС РФ на электростанциях в большем количестве были введены газовые турбины электрической мощностью 60–99 МВт, в то время как в период 2010–2014 гг. – газовые турбины мощностью 30–59 МВт. При определении удельных капиталовложений в строительство ПГУ отмечено, что на их величину оказывают большое влияние региональные и местные особенности при строительстве. Отмечается «увеличение значений показате-

лей средних удельных капитальных вложений в регионах, характеризующихся холодным климатом» [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты исследований объемов вводимых на ТЭС РФ энергетических газовых турбин в диапазоне единичных электрических мощностей 30–125 МВт, работающих в составе блоков ПГУ в период с 2015 по 2020 г. Рассчитаны средние удельные капитальные вложения и средние удельные расходы топлива на отпуск электрической и тепловой энергии для введенных за эти годы ПГУ по ОЭС РФ. Для выполнения исследований турбины были классифицированы на три группы по электрической мощности: 30–59 МВт, 60–99 МВт, 100–125 МВт. Проведена оценка их количественного распределения по ОЭС. Приведены результаты сравнения количественных вводов энергетических газовых турбин в период с 2010 г. до экономического кризиса 2014 г. и в период после 2014 г. до настоящего времени, а также предварительная оценка увеличения средних удельных капитальных вложений в строительство блоков ПГУ, в составе которых имелись одинаковые по электрической мощности газовые турбины. Выполненные исследования и представленная на их основе информация по реализованным в РФ проектам ПГУ и ГТУ позволяют оценить темпы ввода, энергетическую и экономическую эффективность работы газотурбинного оборудования на российских ТЭС с учетом климатических условий регионов и эксплуатационных особенностей ряда электростанций, а также могут оказаться полезными при выполнении прогнозной оценки потребности во вводе газовых турбин на ближайшие годы в диапазоне единичных мощностей 30–125 МВт.

Список источников

1. Неуймин В. М. Особенности освоения газовой турбины ГТЭ-110 ПГУ-325 // Газотурбинные технологии. 2013. № 3. С. 2–7.
2. Ольховский Г. Г., Трушечкин В. П. Перспективы повышения экономичности ГТУ и ПГУ // Электрические станции. 2013. № 1. С. 2–7.
3. Липатов Т. В. Масштабы и опыт применения ГТУ и

- ПГУ в АО «ИНТЕР РАО – Электрогенерация» // Газотурбинные технологии. 2018. № 7. С. 10–13.
4. Chen Lingen, Yang Bo, Feng Huijun, Ge Yanlin, Xia Shaojun. Performance optimization of an open simple-cycle gas turbine combined cooling, heating and power plant driven by basic oxygen furnace gas in China's steelmaking plants // Energy. 2020. Vol. 203. P. 117791.

- <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117791>.
5. Bade M. H., Bandyopadhyay S. Analysis of gas turbine integrated cogeneration plant: process integration approach // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 78. P. 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.024>.
6. Бирюков Б. В. Об эффективности производства теплоты в отопительных теплоцентралях с паровыми котлами и газовыми турбинами // *Промышленная энергетика*. 2009. № 7. С. 39–41.
7. Canepa R., Wang Meihong. Techno-economic analysis of a CO₂ capture plant integrated with a commercial scale combined cycle gas turbine (CCGT) power plant // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 74. P. 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.014>.
8. Haji V. H., Fekih A., Monje A., Asfestani R. F. Adaptive model predictive control design for the speed and temperature control of a V94.2 gas turbine unit in a combined cycle power plant // *Energy*. 2020. Vol. 207. P. 118259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118259>.
9. Степанова Е. Л., Сушко С. Н. Определение средних удельных капиталовложений в строительство ПГУ, введенных в РФ за период 2010–2014 гг. // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 11. С. 171–175.
10. Boyce M. P. An overview of gas turbines // *Gas Turbine Engineering Handbook (Fourth Edition)*. 2012. P. 3–88. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383842-1.00001-9>.
11. Al-Attab K. A., Zainal Z. A. Externally fired gas turbine technology: a review // *Applied Energy*. 2015. Vol. 138. P. 474–487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.049>.
12. Yang Xiaochen, Li Hongwei, Svendsen Svend. Evaluations of different domestic hot water preparing methods with ultra-low-temperature district heating // *Energy*. 2016. Vol. 109. P. 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.109>.
13. Liu Xuezhi, Wu Jianzhong, Jenkins N., Bagdanavicius A. Combined analysis of electricity and heat networks // *Applied Energy*. 2016. Vol. 162. P. 1238–1250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.102>.
14. Leitner B., Widl E., Gawlik W., Hofmann R. A method for technical assessment of power-to-heat use cases to couple local district heating and electrical distribution grids // *Energy*. 2019. Vol. 182. P. 729–738. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.016>.
15. Wang Ligang, Voll P., Lampe M., Yang Yongping, Bardow A. Superstructure-free synthesis and optimization of thermal power plants // *Energy*. 2015. Vol. 91. P. 700–711. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.068>.
16. Kowalczyk Ł., Elsner W., Niegodajew P., Marek M. Gradient-free methods applied to optimization of advanced ultra-supercritical power plant // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 96. P. 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.091>.
17. Plis M., Rusinowski H. Predictive, adaptive model of PG 9171E gas turbine unit including control algorithms // *Energy*. 2017. Vol. 126. P. 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.027>.
18. Mehrgoo M., Amidpour M. Constructal design and optimization of a dual pressure heat recovery steam generator // *Energy*. 2017. Vol. 124. P. 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.046>.
19. Клер А. М., Тюрина Э. А. Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. 298 с.
20. Kler A. M., Zharkov P. V., Epishkin N. O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods // *Energy*. 2019. Vol. 189. P. 116230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>.
21. Шадек Е., Маршак Б., Анохин А., Горшков В. Глубокая утилизация тепла отходящих газов теплогенераторов // *Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ*. 2014. № 2. С. 21–25.
22. Аронов И. З., Пресич Г. А. Опыт эксплуатации контактных экономайзеров на Первоуральской ТЭЦ // *Промышленная энергетика*. 1991. № 8. С. 17–20.
23. Terhan M., Comakli K. Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 100. P. 1007–1015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.122>.
24. Shang Sheng, Li Xianting, Chen Wei, Wang Baolong, Shi Wenxing. A total heat recovery system between the flue gas and oxidizing air of a gas-fired boiler using a non-contact total heat exchanger // *Applied Energy*. 2017. Vol. 207. P. 613–623. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.169>.
25. Степанова Е. Л., Жарков П. В. Исследование эффективности дожигания топлива в дополнительной камере сгорания ГТУ, имеющей контактный теплообменник для подогрева подпиточной сетевой воды // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2020. № 2. С. 133–140. <https://doi.org/10.31857/S0002331020020120>.
26. Демченко К. В. Основные принципы организации оптового рынка электроэнергии и мощности Российской Федерации // *Главный энергетик*. 2019. № 12. С. 23–27.
27. Пеньковский А. В., Стенников В. А. Математическое моделирование рынка тепловой энергии в формате единой теплоснабжающей организации // *Теплоэнергетика*. 2018. № 7. С. 42–53. <https://doi.org/10.1134/S004036361807007X>.
28. Kler A. M., Stepanova E. L., Maksimov A. S. Investigating the efficiency of a steam-turbine heating plant with a back-pressure steam turbine and waste-heat recovery // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018. Vol. 25. No. 6. P. 929–938. <https://doi.org/10.1134/S0869864318060136>.
29. Клер А. М., Максимов А. С., Степанова Е. Л., Жарков П. В., Тарариев Р. А., Перевалов Е. Г. [и др.]. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом реального состояния основного оборудования // *Теплоэнергетика*. 2009. № 6. С. 53–57.

References

1. Neuymin V. M. Features of GTE-110 PGU-325 gas turbine development. *Gazoturbinnye tekhnologii*. 2013;3:2-7. (In Russ.).
2. Olkhovsky G. G., Trushechkin V. P. Prospects for increasing efficiency of gas turbine and combined cycle gas turbine plants. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2013;1:2-8. (In Russ.).
3. Lipatov T. V. Scale and application experience of gas turbine and combined cycle gas turbine plants in JSC INTER RAO – Electricity Generation. *Gazoturbinnye tekhnologii*. 2018;7:10-13. (In Russ.).
4. Chen Lingen, Yang Bo, Feng Huijun, Ge Yanlin, Xia Shaojun. Performance optimization of an open simple-cycle gas turbine combined cooling, heating and power plant driven by basic oxygen furnace gas in China's steelmaking plants. *Energy*. 2020;203:117791. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117791>.
5. Bade M. H., Bandyopadhyay S. Analysis of gas turbine integrated cogeneration plant: process integration approach. *Applied Thermal Engineering*. 2015;78:118-128. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.024>.
6. Biryukov B. V. On heat production efficiency of district heating plants equipped with steam boilers and gas turbines. *Promyshlennaya energetika*. 2009;7:39-41. (In Russ.).
7. Canepa R., Wang Meihong. Techno-economic analysis of a CO₂ capture plant integrated with a commercial scale combined cycle gas turbine (CCGT) power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2015;74:10-19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.014>.
8. Haji V. H., Fekih A., Monje A., Asfestani R. F. Adaptive model predictive control design for the speed and temperature control of a V94.2 gas turbine unit in a combined cycle power plant. *Energy*. 2020;207:118259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118259>.
9. Stepanova E. L., Sushko S. N. Determination of average specific investments in the construction of combined cycle plants introduced in operation in Russia in 2010-2014. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;11:171-175. (In Russ.).
10. Boyce M. P. An overview of gas turbines. *Gas Turbine Engineering Handbook (Fourth Edition)*. 2012;3-88. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383842-1.00001-9>.
11. Al-Attab K. A., Zainal Z. A. Externally fired gas turbine technology: a review. *Applied Energy*. 2015;138:474-487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.049>.
12. Yang Xiaochen, Li Hongwei, Svendsen Svend. Evaluations of different domestic hot water preparing methods with ultra-low-temperature district heating. *Energy*. 2016;109:248-259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.109>.
13. Liu Xuezhi, Wu Jianzhong, Jenkins N., Bagdanavicius A. Combined analysis of electricity and heat networks. *Applied Energy*. 2016;162:1238-1250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.102>.
14. Leitner B., Widl E., Gawlik W., Hofmann R. A method for technical assessment of power-to-heat use cases to couple local district heating and electrical distribution grids. *Energy*. 2019;182:729-738. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.016>.
15. Wang Ligang, Voll P., Lampe M., Yang Yongping, Bardow A. Superstructure-free synthesis and optimization of thermal power plants. *Energy*. 2015;91:700-711. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.068>.
16. Kowalczyk Ł., Elsner W., Niegodajew P., Marek M. Gradient-free methods applied to optimization of advanced ultra-supercritical power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2016;96:200-208. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.091>.
17. Plis M., Rusinowski H. Predictive, adaptive model of PG 9171E gas turbine unit including control algorithms. *Energy*. 2017;126:247-255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.027>.
18. Mehrgoo M., Amidpour M. Constructal design and optimization of a dual pressure heat recovery steam generator. *Energy*. 2017;124:87-99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.046>.
19. Kler A. M., Tyurina E. A. *Optimization studies of power plants and complexes*. Novosibirsk: Geo; 2016, 298 p. (In Russ.).
20. Kler A. M., Zharkov P. V., Epishkin N. O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. *Energy*. 2019;189:116230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>.
21. Shadek E., Marshak B., Anokhin A., Gorshkov V. Deep heat recovery of heat generator waste gases. *Promyshlennye i otopitel'nye kotel'nye i mini-TEC*. 2014;2:21-25. (In Russ.).
22. Aronov I. Z., Presich G. A. Operation experience of contact economizer at Pervouralskaya CHPP. *Promyshlennaya energetika*. 1991;8:17-20. (In Russ.).
23. Terhan M., Comakli K. Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas. *Applied Thermal Engineering*. 2016;100:1007-1015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.122>.
24. Shang Sheng, Li Xianting, Chen Wei, Wang Baolong, Shi Wenxing. A total heat recovery system between the flue gas and oxidizing air of a gas-fired boiler using a non-contact total heat exchanger. *Applied Energy*. 2017;207:613-623. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.169>.
25. Stepanova E. L., Zharkov P. V. Investigation of the efficiency of fuel afterburning in an additional gas turbine unit chamber with a contact heat exchanger for heating make-up network water. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2020;2:133-140. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002331020020120>.
26. Demchenko K. V. Basic principles of organization of the wholesale electricity and capacity market of the Russian Federation. *Glavnyj jenergetik*. 2019;12:23-27. (In Russ.).
27. Penkovskii A. V., Stennikov V. A. Mathematical modeling of the heat energy market on a single heat supplier basis. *Teploenergetika = Thermal*

Engineering. 2018;7;42-53. (In Russ.).
<https://doi.org/10.1134/S004036361807007X>.
28. Kler A. M., Stepanova E. L., Maksimov A. S. Investigating the efficiency of a steam-turbine heating plant with a back-pressure steam turbine and waste-heat recovery. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018;25(6):929-938.

<https://doi.org/10.1134/S0869864318060136>.
29. Kler A. M., Maksimov A. S., Stepanova E. L., Zharkov P. V., Tarariev R. A., Perevalov E. G. Optimizing the operating modes of cogeneration stations taking actual state of main equipment into account. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2009;6:53-57. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степанова Елена Леонидовна,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник Отдела теплосиловых систем,
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Овчинников Анатолий Петрович,
инженер,
Отдел теплосиловых систем,
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 17.09.2021; одобрена после рецензирования 29.10.2021; принята к публикации 24.12.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena L. Stepanova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Department of Heat Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Anatoly P. Ovchinnikov,
Engineer of the Department of Heat Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 17.09.2021; approved after reviewing 29.10.2021; accepted for publication 24.12.2021.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 546.77:669.283

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-773-781>

Термодинамическое моделирование обжига сульфидного молибденового концентрата с гидроксидом кальция

Дмитрий Сергеевич Алешин^{1✉}, Алексей Геннадьевич Крашенинин²,
Полина Владимировна Зайцева³, Игорь Николаевич Танутров⁴

¹⁻⁴Институт металлургии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия

¹dmitriy.aleshin1@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2404-5452>

²agkrash@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7321-1509>

³zaitcevapolina@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8401-7867>

⁴intan38@live.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8610-8749>

Резюме. Цель – определение условий формирования CaMoO_4 , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ при окислении MoS_2 и ReS_2 в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В качестве исходного сырья для термодинамического моделирования окислительного обжига в присутствии добавки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ выбран концентрат Южно-Шамейского месторождения, расположенного в Свердловской области, с содержанием 37% масс. Мо и 0,005% масс. Ре. Термодинамическое моделирование по определению оптимального количества кальцийсодержащей добавки проводили при следующих массовых соотношениях: молибденовый концентрат : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 1:0,8, 1:1, 1:1,2 и 1:1,5 в диапазоне температур 100–800°C, с шагом 100°C, давлении системы 0,1 МПа в атмосфере воздуха (мольное соотношение: молибденовый концентрат + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: воздух = 1:5). Данные по содержанию всех компонентов в пробе вводились в программный комплекс HSC 6.1 в молях. Показаны основные реакции окислительного обжига молибденового концентрата в присутствии гидроксида кальция. Установлено, что основными фазами, образующимися в результате обжига, являются CaSO_4 , CaSO_3 , MoO_3 , CaMoO_4 , CaMoO_3 , CaReO_4 . Изучено влияние температуры на образование основных газообразных продуктов при различном массовом соотношении молибденового концентрата и $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Установлено, что при соотношении в пробе 1:1 молибденового концентрата и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ до 600°C не наблюдается выделения сернистого ангидрида выше значений предельно допустимых концентраций. На основе рассчитанных термодинамических данных выполнено моделирование процесса обжига молибденового концентрата с гидроксидом кальция. Установлено оптимальное соотношение, необходимое для успешного протекания процесса: молибденовый концентрат : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 1:1 по массе. Термодинамическое моделирование показало, что в интервале температур 100–600°C при использовании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не происходит потерь рения и молибдена, выделение серы не превышает 10 мг/м³.

Ключевые слова: производство молибдена, сульфидный молибденовый концентрат, пылегазоочистка, энергия Гиббса, сернистый ангидрид, обжиг молибденового концентрата

Благодарности: Работа выполнена по государственному заданию ИМЕТ УрО РАН в рамках программы фундаментальных исследований государственных академий № госрегистрации: 0396-2019-0005.

Для цитирования: Алешин Д. С., Крашенинин А. Г., Зайцева П. В., Танутров И. Н. Термодинамическое моделирование обжига сульфидного молибденового концентрата с гидроксидом кальция // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 773–781. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-773-781>.

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Thermodynamic modelling of roasting of molybdenum sulphide concentrate with calcium hydroxide

Dmitriy S. Aleshin^{1✉}, Aleksey G. Krashenin², Polina V. Zaitseva³, Igor N. Tanutrov⁴

¹⁻⁴Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

¹dmitriy.aleshin1@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2404-5452>

²agkrash@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7321-1509>

³zaitcevapolina@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8401-7867>

⁴intan38@live.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8610-8749>

Annotation. This work aims to determine the conditions for the CaMoO_4 , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ formation during oxidation of MoS_2 and ReS_2 in the presence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. The concentrate from the Yuzhno-Shameyskoye deposit in the Sverdlovsk region, having 37% wt. Mo and 0.005% wt. Re, was selected as a feedstock for thermodynamic modelling of sweet roasting in the presence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. To determine the optimal amount of calcium-containing additives, the thermodynamic modelling was carried out using the following mass ratios: molybdenum concentrate: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 1:0.8, 1:1, 1:1.2 and 1:1.5 in the temperature range of 100–800°C, with a step of 100°C, system pressure of 0.1 MPa in the air (molar ratio: molybdenum concentrate + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: air = 1:5). The content of all sample components in moles was entered into the HSC 6.1 software package. The main reactions associated with the sweet roasting of molybdenum concentrate in the presence of calcium hydroxide were shown. It was established that the main phases formed as a result of roasting comprise CaSO_4 , CaSO_3 , MoO_3 , CaMoO_4 , CaMoO_3 and CaReO_4 . The effect of temperature on the formation of the main gaseous products was studied under different mass ratios of molybdenum concentrate and $\text{Ca}(\text{OH})_2$. It was found that up to 600°C, with molybdenum concentrate to $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ratio of 1:1, the concentrations of released sulphurous anhydride are lower than the maximum permissible concentrations. The calculated thermodynamic data was used for modelling the roasting process of molybdenum concentrate with calcium hydroxide. An optimal ratio necessary for the successful process operation was established: molybdenum concentrate: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 1:1 by weight. Thermodynamic modelling showed that, in the temperature range of 100–600°C when using $\text{Ca}(\text{OH})_2$, no rhenium and molybdenum loss is observed, the release of sulfur is less than 10 mg/m³.

Keywords: molybdenum production, sulfide molybdenum concentrate, dust and gas purification, Gibbs energy, sulfur dioxide, roasting of molybdenum concentrate

Acknowledgments: The research was performed by the state assignment of the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences within the framework of the program of fundamental research of state academies. State registration No. 0396-2019-0005.

For citation: Aleshin D. S., Krashenin A. G., Zaitseva P. V., Tanutrov I. N. Thermodynamic modelling of roasting of molybdenum sulphide concentrate with calcium hydroxide. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):773-781. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-773-781>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и в мире молибден производят по технологии, включающей в себя обжиг сульфидного молибденового концентрата для снижения содержания серы в огарке [1]. Данный способ приносит непоправимый вред окружающей среде, так как в атмосферу выбрасывается значительная часть сернистого ангидрида, поэтому во всем мире ведутся разработки альтернативных экологически чистых технологий переработки молибденового сырья [2–14]. Для предотвращения этих выбросов на заводах устанавливаются дорогостоящие системы пылегазоочистки, что в разы повышает стоимость производства молибдена. В Институте металлургии Уральского отделения РАН продолжаются исследования по поиску экологически чистой технологии производства молибдена и рения из сульфидных концентратов путем обжига концентратов с добавкой $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [15, 16].

Сочетание теоретического и экспериментального методов позволяет существенно сократить время и расход материалов в ходе

разработки, испытаний и масштабирования технологий. Предварительное обоснование режимов процессов обжига целесообразно проводить теоретически [17]. Данный подход реализуют с помощью термодинамического моделирования, которое заключается в анализе поведения многокомпонентной гетерогенной высокотемпературной системы на основе расчета ее полного равновесного химического состава в экстремуме термодинамического потенциала (максимизация энтропии или минимизация энергии Гиббса) при учете большинства потенциально возможных в равновесии компонентов [18, 19]. Кроме того, теоретически оценена возможность протекания рассматриваемых реакций между молибденовым концентратом и кальцийсодержащей добавкой. Термодинамическое моделирование и оценка возможности протекания реакций выполнена с помощью программного комплекса HSC 6.1.

Цель работы: определение условий формирования CaMoO_4 , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ при окислении MoS_2 и ReS_2 в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В представленной работе для обоснования технологии и выбора оптимальных параметров (температура, масса добавки) окислительного обжига сульфидного молибденового концентрата с добавкой $\text{Ca}(\text{OH})_2$ проведено термодинамическое моделирование. В качестве исходного сырья для окислительного обжига в присутствии добавки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ выбран концентрат Южно-Шамейского месторождения, которое расположено в Свердловской области. Согласно атомно-эмиссионному с индуктивно-связанной плазмой анализу, химический состав концентрата приведен в табл. 1.

С целью выбора оптимального количества добавки нами выполнено термодинамическое моделирование при массовых соотношениях: молибденовый концентрат: $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 1:0.8, 1:1, 1:1.2$ и $1:1.5$. Содержание всех компонентов пробы вводили в программный комплекс HSC 6.1 в молях. В термодинамической базе этого комплекса имеются свойства оксидов, пероксидов и сульфидов рения, а данные о перренатах CuReO_4 , $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ и других соединениях отсутствуют. Базу данных программного комплекса дополнили рассчитанными ранее свойствами перренатов металлов [20].

В расчетах также учитывали тот факт, что нам неизвестно, как взаимодействуют проба концентрата, смешанная с добавкой, с окружающей атмосферой. Поэтому мы меняли степень взаимодействия компонентов с кислородом воздуха, варьируя мольное соотношение: проба/воздух. Сопоставляя результаты моделирования, нашли оптимальное мольное соотношение: молибденовый концентрат + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: воздух = $1:5$. Таким образом, термодинамические расчеты проведены в диапазоне температур $100\text{--}800^\circ\text{C}$, с шагом 100°C , при давлении системы 0.1 МПа в атмосфере воздуха (мольное соотношение: молибденовый концентрат + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: воздух = $1:5$).

Для корректности расчетов применяли принцип последовательных термохимических преобразований в открытой термодинамиче-

ской системе: если, согласно расчетам, при повышении температуры происходят потери части компонентов в газовую фазу, то на последующих температурных точках расчета, соответственно, им корректируются качественные и количественные исходные химические составы системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Поскольку молибденовый концентрат в основном состоит из дисульфида молибдена, а рений присутствует в виде дисульфида рения – рассмотрены следующие предполагаемые реакции окисления дисульфида молибдена и дисульфида рения [1, 17]:

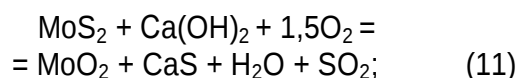
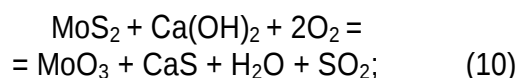
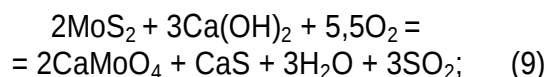
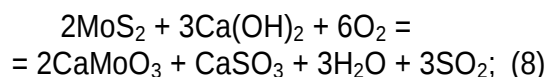
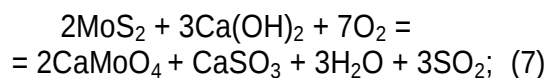
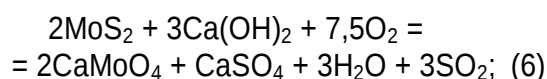
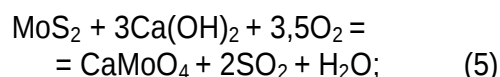
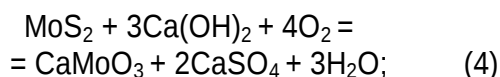
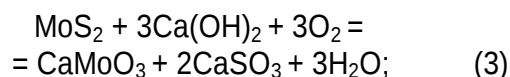
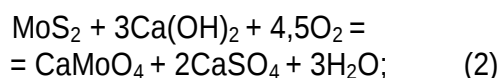
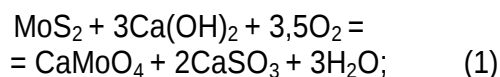
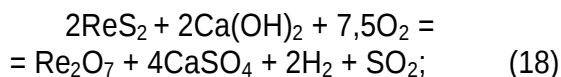
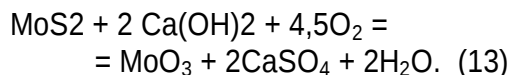
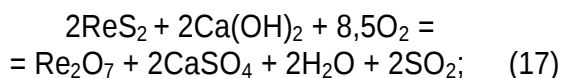
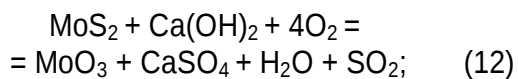
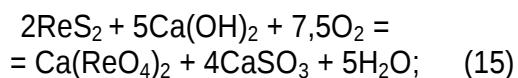
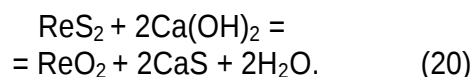
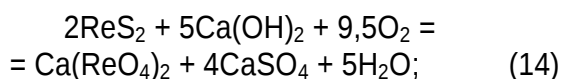
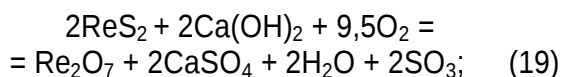


Таблица 1. Химический состав молибденового концентрата с Южно-Шамейского месторождения (в % по массе)
Table 1. Chemical composition of molybdenum concentrate from the Yuzhno-Shameyskoye deposit (% w/w)

Элемент	Mo	S	Al	Ca	Cu	Fe	O	Si	Na	Ti	P	Re	K	Mg	Pb
масс. %	37	35,4	0,65	0,332	2,03	5	13,3	4,36	0,23	0,032	0,036	0,0049	0,75	0,72	0,154



Предполагаемые реакции окисления дисульфида рения:



В табл. 2 приведены результаты по изменению свободной энергии Гиббса (ΔG_t) при различных температурах для окислительных реакций с дисульфидом молибдена и рения.

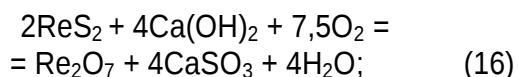


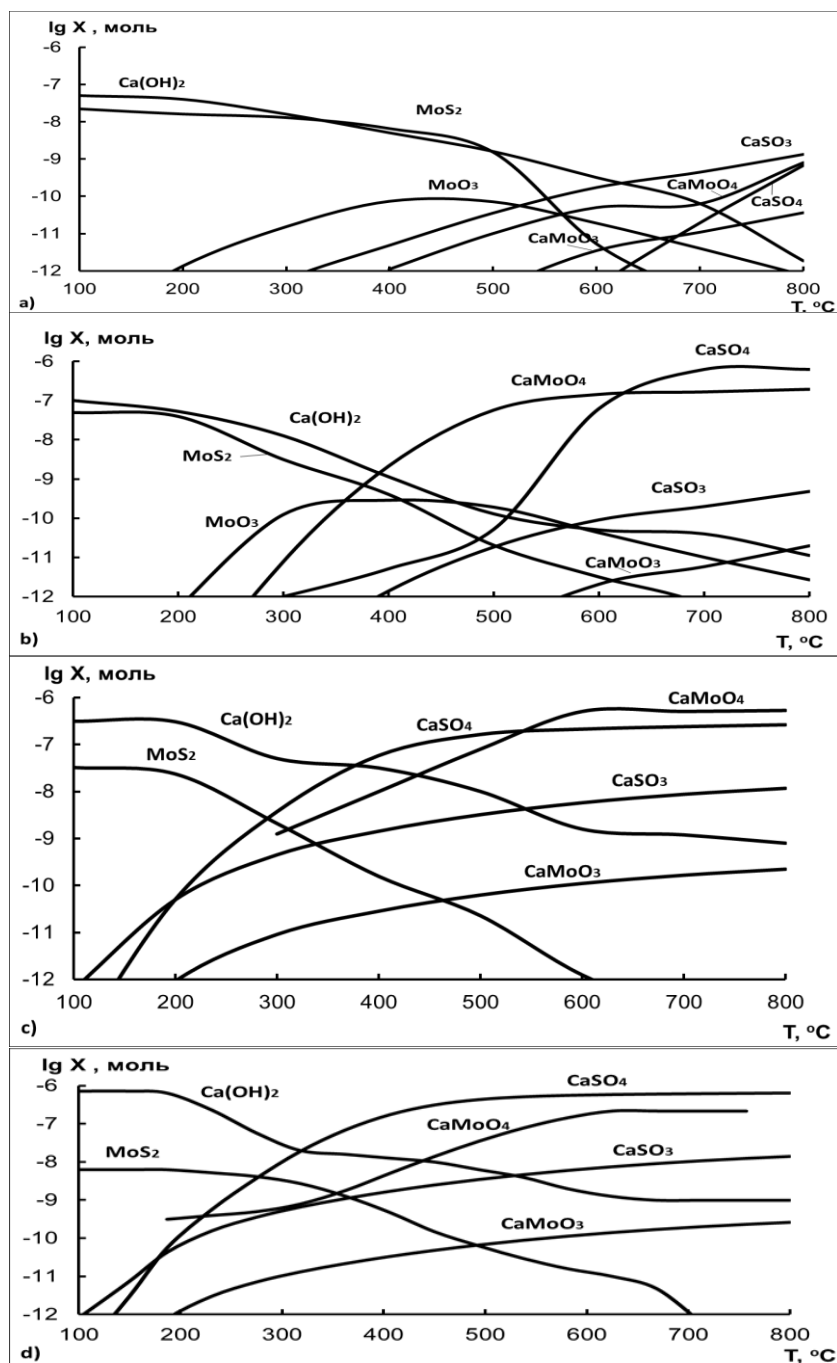
Таблица 2. Изменение свободной энергии Гиббса (ΔG_t , кДж/моль) для реакций дисульфидом молибдена с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при различных температурах обжига (T , °C)

Table 2. Variations of Gibbs free energy (ΔG_t , kJ/mol) in molybdenum disulfide and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reactions at different roasting temperatures (T , °C)

ΔG_t , кДж/моль								
№ \ T, °C	100	200	300	400	500	600	700	800
1	-1301.38	-1286.3	-1270.3	-1253.8	-1236.6	-1218.9	-1200.9	-1178.2
2	-1785.5	-1751	-1716	-1680	-1645	-1609	-1573.2	-1532
3	-1050	-1041.7	-1032.5	-1022.4	-1011.6	-1000	-988	-971.7
4	-1534.2	-1506.4	-1478.1	-1449.2	-1420	-1390.5	-1360.7	-1326.4
5	-1095.2	-1088.8	-1082.2	-1075.3	-1068.2	-1061	-1053.6	-1044.8
6	-2535.6	-2508.8	-2481.3	-2453.2	-2424.8	-2396.1	-2367.1	-2333.6
7	-2293.5	-2276.4	-2258.5	-2239.8	-2220.6	-2201	-2181	-2156.3
8	-1790.8	-1787.4	-1782.7	-1777	-1770.6	-1763.5	-1755.9	-1743.4
9	-1705	-1714.2	-1722.4	-1729.8	-1736.5	-1742.7	-1748.3	-1749
10	-500.1	-501	-501.6	-501.9	-502	-501.9	-501.4	-501.2
11	-369.9	-377.9	-385.5	-392.7	-399.7	-406.3	-412.8	-417.6
12	-1330.7	-1295.7	-1260.5	-1225.4	-1190.3	-1155.4	-1120.5	-1084.4
13	-1675.9	-1626.7	-1577.4	-1528.1	-1478.7	-1429.5	-1380.39	-1328.5
14	-3661.9	-3505.8	-3351.1	-3198	-3046.6	-2896.76	-2748.50	-2601.85
15	-2694.26	-2576.97	-2460.51	-2344.93	-2230.3	-2116.745	-2004.29	-1893.04
16	-2267.8	-2224.6	-2180.1	-2134.5	-2088.1	-2041	-1993.3	-1939.3
17	-2545.8	-2491.9	-2437.5	-2382.9	-2328.1	-2273.3	-2218.4	-2160.6
18	-2095.2	-2050.9	-2006.4	-1962.1	-1917.8	-1873.7	-1829.7	-1782.9
19	-2673.6	-2600.7	-2527.4	-2453.9	-2380.4	-2306.9	-2233.4	-2157.1
20	625.2	571.5	518.8	467	416.2	366.3	317.1	271.7

Из данных табл. 2 видно, что равновесие большинства реакций, кроме реакции 20, сдвинуто вправо. Исходя из значений ΔG° , наиболее вероятные реакции окисления дисульфида молибдена 6 и 7, представленные

системами $2\text{MoS}_2-3\text{Ca}(\text{OH})_2-7,5\text{O}_2$ и $2\text{MoS}_2-3\text{Ca}(\text{OH})_2-7\text{O}_2$. Соответственно, предполагаемой основной реакцией окисления дисульфида рения является реакция 14, представленная системой: $2\text{ReS}_2-5\text{Ca}(\text{OH})_2-9,5\text{O}_2$.



Рассчитанные зависимости логарифма равновесного количества индивидуальных веществ, содержащих молибден и серу (моль), от температуры T обжига при массовом соотношении:

$M_k : \text{Ca}(\text{OH})_2$: а – 1:0.8; б – 1:1; в – 1:1.2; д – 1:1.5

Calculated dependences of the logarithm of equilibrium amount of individual substances containing molybdenum and sulfur (mol) on the roasting temperature T at the mass ratio: $M_k : \text{Ca}(\text{OH})_2$: а – 1:0.8; б – 1:1; в – 1:1.2; д – 1:1.5

Интересны к рассмотрению реакции 1, 2, представленные соответствующими системами: $\text{MoS}_2\text{--}3\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--}3,5\text{O}_2$, $\text{MoS}_2\text{--}3\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--}4,5\text{O}_2$. Они имеют близкие значения ΔG° и вероятность их протекания следует за реакцией 6. Подобная ситуация обстоит и с системами: $2\text{ReS}_2\text{--}5\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--}7,5\text{O}_2$; $2\text{ReS}_2\text{--}4\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--}7,5\text{O}_2$; $2\text{ReS}_2\text{--}2\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--}8,5\text{O}_2$ (реакции 15, 16, 17).

вышает 10 мг/м^3 . Основная часть серы при обжиге находится в виде CaSO_4 и CaSO_3 , молибден – в виде MoO_3 , CaMoO_4 и CaMoO_3 . Фазовые состояния веществ образованы по следующим реакциям процесса обжига молибденового концентрата: 6, 7, 13, 15, 16. Оптимальной температурой обжига с гидроксидом кальция можно считать 600°C .

Таблица 3. Содержание газообразных веществ от температуры в системах при различном соотношении: $\text{Mk}:\text{Ca}(\text{OH})_2$
Table 3. Content of gaseous substances versus temperature in systems at different ratios: $\text{Mk}:\text{Ca}(\text{OH})_2$

$\text{Mk} : \text{Ca}(\text{OH})_2$	$T, ^\circ\text{C}$ Фаза, kmol	100	200	300	400	500	600	700	800
1:0.8	SO_2	2.69E-14	7.84E-09	2.65E-05	6.02E-03	6.87E-02	1.60E-01	1.89E-01	2.08E-01
	Re_2O_7	1.00E-36	1.00E-36	6.55E-26	2.63E-17	8.16E-10	2.45E-08	5.52E-05	1.22E-03
1:1	SO_2	4.53E-21	1.34E-15	8.12E-14	2.74E-10	3.54E-09	2.44E-07	8.67E-05	1.40E-02
	Re_2O_7	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	8.56E-36	2.07E-36	1.32E-26	2.22E-11
1:1.2	SO_2	3.33E-24	3.35E-24	9.51E-15	1.07E-13	1.66E-10	2.60E-07	2.89E-05	3.39E-04
	Re_2O_7	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.56E-36	2.27E-36	3.32E-36	4.22E-21
1:1.5	SO_2	2.69E-24	7.84E-24	2.65E-15	6.02E-13	6.87E-10	1.60E-07	1.89E-05	2.08E-04
	Re_2O_7	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.40E-36	2.44E-36	2.77E-36	4.48E-28

Результаты термодинамического моделирования в виде зависимостей содержаний соединений от температуры приведены на рисунке.

В табл. 3 показано влияние температуры на процесс образования основных газообразных продуктов при различном массовом соотношении: $\text{Mk} : \text{Ca}(\text{OH})_2$.

Согласно полученным данным (см. рис. 1, табл. 3), при обжиге концентрата с гидроксидом кальция, незначительные потери рения в виде Re_2O_7 , а также серы в виде SO_2 наблюдались при массовом соотношении $\text{Mk} : \text{Ca}(\text{OH})_2 = 1:0.8$ и температуре обжига выше 700°C . Концентрация $\text{SO}_{2(g)}$ при соотношении $\text{Mk} : \text{Ca}(\text{OH})_2 \geq 1:1$ до 600°C не пре-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рассчитанных термодинамических данных выполнено моделирование процесса обжига молибденового концентрата с гидроксидом кальция. Установлено оптимальное соотношение, необходимое для успешного протекания процесса: Mk к $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 1:1$ по массе. Термодинамическое моделирование показало, что в интервале температур $100\text{--}600^\circ\text{C}$ при использовании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не происходит потерь рения и молибдена, наблюдается незначительное выделение серы. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными, что говорит о достоверности термодинамического моделирования.

Список источников

1. Зеликман А. Н. Молибден. М.: Изд-во «Металлургия», 1970. 441 с.
2. Shi Lihua, Wang Xue-Wen, Wang Ming-Yu, Peng Jun, Xiao Caixia. Extraction of molybdenum from high-impurity ferromolybdenum by roasting with Na_2CO_3 and CaO and leaching with water // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. Iss. 3-4. P. 214–219. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.04.009>.
3. Lianyong Wang, Wenqiang Sun, Jingfan Zhang, Jiuju

- Cai. A novel self-heated roasting technology for molybdenum concentrate // Rare Metal Materials and Engineering. 2015. Vol. 44. Iss. 11. P. 2618–2622. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(16\)60005-X](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(16)60005-X).
4. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS_2 and MoS_2 in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 840–848.

[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).

5. Wang Xue-Wen, Peng Jun, Wang Ming-Yu, Ye Pu-Hong, Xiao Yuan. The role of CaO in the extraction of Ni and Mo from carbonaceous shale by calcification roasting, sulphation roasting and water leaching // *International Journal of Mineral Processing*. 2011. Vol. 100. Iss. 3-4. P. 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.012>.
6. Wang Lu, Zhang Guo-hua, Dang Jie, Chou Kuo-chih. Oxidation roasting of molybdenite concentrate // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015. Vol. 25. Iss. 12. P. 4167–4174. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)64067-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)64067-5).
7. Zhou Qiu-sheng, Yun Wei-tao, Xi Jun-tao, Li Xiao-bin, Qi Tian-gui, Liu Gui-hua. Molybdenite–limestone oxidizing roasting followed by calcine leaching with ammonium carbonate solution // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. Vol. 27. Iss. 7. P. 1618–1626. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60184-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60184-5).
8. Sun Hu, Li Guanghui, Yu Junjie, Luo Jun, Rao Mingjun, Peng Zhiwei, et al. A novel simultaneous oxidizing-volatilizing process for efficient separation of pure MoO₃ from structure self-sustained molybdenite concentrate pellets // *Powder Technology*. 2019. Vol. 345. P. 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.021>.
9. Fu Yun-feng, Xiao Qing-gui, Gao Yi-ying, Ning Peng-ge, Xu Hong-bin, Zhang Yi. Pressure aqueous oxidation of molybdenite concentrate with oxygen // *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 174. P. 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.001>.
10. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS₂ and MoS₂ in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 840–848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).
11. Li Xiao-bin, Wu Tao, Zhou Qiu-sheng, Qi Tian-gui, Peng Zhi-hong, Liu Gui-hua. Kinetics of oxidation roasting of molybdenite with different particle sizes // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021. Vol. 31. Iss. 3. P. 842–852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65543-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65543-7).
12. Zhou Qiu-sheng, Yun Wei-tao, Xi Jun-tao, Li Xiao-bin, Qi Tian-gui, Liu Gui-hua, et al. Molybdenite–limestone oxidizing roasting followed by calcine leaching with ammonium carbonate solution // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. Vol. 27. Iss. 7. P. 1618–1626. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60184-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60184-5).
13. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS₂ and MoS₂ in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 840–848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).
14. Li Xiao-bin, Wu Tao, Zhou Qiu-sheng, Qi Tian-gui, Peng Zhi-hong, Liu Gui-hua. Kinetics of oxidation roasting of molybdenite with different particle sizes // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021. Vol. 31. Iss. 3. P. 842–852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65543-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65543-7).
15. Харин Е. И., Халезов Б. Д., Зеленин Е. А. Разработка экологически чистой комплексной технологии переработки молибденового концентрата Южно-Шамейского месторождения // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015. № 5. С. 129–134.
16. Ватолин Н. А., Халезов Б. Д., Харин Е. И., Зеленин Е. А. Поиск экологически чистой технологии переработки молибденовых концентратов // *Химическая технология*. 2012. Т. 13. № 4. С. 229–232.
17. Киреев В. А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. М.: Изд-во «Химия», 1975. 536 с.
18. Ватолин Н. А., Моисеев Г. К., Трусков Б. Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Изд-во «Металлургия», 1994. 234 с.
19. Gan Min, Fan Xiao-hui, Chen Xu-ling, Wu Cheng-qian, Ji Zhi-yun, Wang Song-rong, et al. Reaction mechanisms of low-grade molybdenum concentrate during calcification roasting process // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26. Iss. 11. P. 3015–3023. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64432-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64432-1).
20. Мельчакова О. В., Зайцева П. В., Майорова А. В., Куликова Т. В., Печищева Н. В., Шуняев К. Ю. Расчет термодинамических свойств перенатов металлов и их использование при моделировании подготовки проб к химическому анализу // *Аналитика и контроль*. 2019. Т. 23. № 4. С. 570–579. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.4.015>.

References

1. Zelikman A.N. *Molybdenum*. Moscow: Metallurgiya; 1970. 441 p. (In Russ.).
2. Shi Lihua, Wang Xue-Wen, Wang Ming-Yu, Peng Jun, Xiao Caixia. Extraction of molybdenum from high-impurity ferromolybdenum by roasting with Na₂CO₃ and CaO and leaching with water. *Hydrometallurgy*. 2011;108(3-4):214–219. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.04.009>.
3. Lianyong Wang, Wenqiang Sun, Jingfan Zhang, Jiuju Cai. A novel self-heated roasting technology for molybdenum concentrate. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2015;44(11):2618–2622. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(16\)60005-X](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(16)60005-X).
4. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS₂ and MoS₂ in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019;29(4):840–848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).
5. Wang Xue-Wen, Peng Jun, Wang Ming-Yu, Ye Pu-Hong, Xiao Yuan. The role of CaO in the extraction of Ni and Mo from carbonaceous shale by calcification roasting, sulphation roasting and water leaching. *International Journal of Mineral Processing*. 2011;100(3-4):130–135. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.012>.

6. Wang Lu, Zhang Guo-hua, Dang Jie, Chou Kuo-chih. Oxidation roasting of molybdenite concentrate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015;25(12):4167-4174. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)64067-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)64067-5).
7. Zhou Qiu-sheng, Yun Wei-tao, Xi Jun-tao, Li Xiao-bin, Qi Tian-gui, Liu Gui-hua. Molybdenite-limestone oxidizing roasting followed by calcine leaching with ammonium carbonate solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(7):1618-1626. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60184-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60184-5).
8. Sun Hu, Li Guanghui, Yu Junjie, Luo Jun, Rao Mingjun, Peng Zhiwei, et al. A novel simultaneous oxidizing-volatilizing process for efficient separation of pure MoO_3 from structure self-sustained molybdenite concentrate pellets. *Powder Technology*. 2019;345:338-345. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.021>.
9. Fu Yun-feng, Xiao Qing-gui, Gao Yi-ying, Ning Peng-ge, Xu Hong-bin, Zhang Yi. Pressure aqueous oxidation of molybdenite concentrate with oxygen. *Hydrometallurgy*. 2017;174:131-139. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.001>.
10. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS_2 and MoS_2 in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019;29(4):840-848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).
11. Li Xiao-bin, Wu Tao, Zhou Qiu-sheng, Qi Tian-gui, Peng Zhi-hong, Liu Gui-hua. Kinetics of oxidation roasting of molybdenite with different particle sizes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021;31(3):842-852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65543-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65543-7).
12. Zhou Qiu-sheng, Yun Wei-tao, Xi Jun-tao, Li Xiao-bin, Qi Tian-gui, Liu Gui-hua, et al. Molybdenite-limestone oxidizing roasting followed by calcine leaching with ammonium carbonate solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(7):1618-1626. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60184-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60184-5).
13. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS_2 and MoS_2 in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019;29(4):840-848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).
14. Li Xiao-bin, Wu Tao, Zhou Qiu-sheng, Qi Tian-gui, Peng Zhi-hong, Liu Gui-hua. Kinetics of oxidation roasting of molybdenite with different particle sizes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021;31(3):842-852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65543-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65543-7).
15. Harin E. I., Halezov B. D., Zelenin E. A. Development of an environmentally friendly integrated processing technology for molybdenum concentrate of the Yuzhno-Shameyskoye deposit. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Gornyj zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2015;5:129-134. (In Russ.).
16. Vatolin N. A., Halezov B. D., Harin E. I., Zelenin E. A. Search for environmentally friendly processing technology for molybdenum concentrates. *Himicheskaya tekhnologiya*. 2012;13(4):229-232.
17. Kireev V. A. *Practical calculation methods in the thermodynamics of chemical reactions*. Moscow: Himiya; 1975, 536 p. (In Russ.).
18. Vatolin N. A., Moiseev G. K., Trusov B. G. *Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems*. Moscow: Metallurgy; 1994, 234 p. (In Russ.).
19. Gan Min, Fan Xiao-hui, Chen Xu-ling, Wu Cheng-qian, Ji Zhi-yun, Wang Song-rong, et al. Reaction mechanisms of low-grade molybdenum concentrate during calcification roasting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016;26(11):3015-3023. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64432-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64432-1).
20. Mel'chakova O. V., Zajceva P. V., Majorova A. V., Kulikova T. V., Pechishcheva N. V., Shunyaev K. Yu. Thermodynamic properties calculation of perrenates and their application in the simulation of sample pretreatment for the chemical analysis. *Analitika i control = Analytics and Control*. 2019;23(4):570-579. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.4.015>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алешин Дмитрий Сергеевич,
аспирант,
младший научный сотрудник,
Лаборатория гетерогенных процессов,
Институт металлургии Уральского отделения РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия

Крашенинин Алексей Геннадьевич,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Лаборатория гетерогенных процессов,
Институт металлургии Уральского отделения РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy S. Aleshin,
Postgraduate student,
Junior Researcher of the Laboratory of Heterogeneous Processes,
Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia

Aleksey G. Krashenin,
Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Laboratory of Heterogeneous Processes,
Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia

Зайцева Полина Владимировна,
кандидат химических наук,
старший научный сотрудник,
Лаборатория аналитической химии,
Институт металлургии Уральского отделения РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия

Polina V. Zaitseva,
Cand. Sci. (Chem.),
Senior Researcher of the Laboratory of Analytical
Chemistry,
Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia

Танутров Игорь Николаевич,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Лаборатория гетерогенных процессов,
Институт металлургии Уральского отделения РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия

Igor. N. Tanutrov,
Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher of the Laboratory of Heterogeneous
Processes,
Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.09.2021; одобрена после рецензирования 05.11.2021; принята к публикации 28.12.2021.

Information about the article

The article was submitted 29.09.2021; approved after reviewing 05.11.2021; accepted for publication 28.12.2021.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 669.18:669.054.82:543.68:669.9

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>

Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства

Бельский Сергей Сергеевич^{1✉}, Зайцева Анна Александровна²,
Тютрин Андрей Александрович³, Исмоилов Зулфикор Зафарович⁴,
Баранов Анатолий Никитич⁵, Сокольников Юлиа Владимировна⁶

¹⁻⁶ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

⁶ Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

¹bss@istu.edu

²vo1odkinaa@yandex.ru,

³an.tu@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

⁴chipa10@yandex.ru

⁵baranov@istu.edu

⁶jsokol1@yandex.ru

Резюме. Цель – на основе анализа существующих способов переработки шлаков сталеплавильного производства, включая десульфурацию и дефосфорацию шлаков, оценить свойства и состав шлаков сталеплавильного производства. Для изучения химического состава исследуемых образцов шлака применялись методы атомно-абсорбционного и оптико-эмиссионного анализов, для исследования микроструктуры – металлографический анализ. Изучены основные направления использования шлаков как в России, так и за рубежом. Показано, что основными направлениями утилизации шлаков сталеплавильного производства являются обезвреживание и обработка шлаков различными методами с последующим использованием в строительной и дорожной отраслях промышленности, а образующиеся фосфорсодержащие продукты – в сельском хозяйстве для замены суперфосфата. Также данные продукты можно использовать для снижения расхода извести и улучшения шлакообразования в сталеплавильном производстве. Выявлены факторы, сдерживающие многократное применение электросталеплавильного и конвертерного шлаков для рафинирования металла, среди которых основным является наличие в шлаках фосфора. По результатам проведенного анализа химического состава образцов шлака электросталеплавильного производства содержание железа составило 33,2% масс., кальция – 19,15% масс., фосфора – 0,33% масс., кремния – 5,39% масс. Железо находится в окисленной форме (FeO , Fe_2O_3 и Fe_3O_4), кремний и кальций присутствуют в виде двукальциевого силиката ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), фосфор представлен силикофосфатом кальция сложного состава – $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)_6(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)$. Фосфор поступает в плавильные агрегаты с минералами пустой породы, агломератом, рудой и флюсами. При повторном использовании шлаков фосфор возвращается обратно в металл, тем самым загрязняя конечный продукт. Возможными направлениями извлечения фосфора из шлаков сталеплавильного производства являются методы магнитной и электростатической сепарации, гравитационного и флотационного обогащения, а также гидрометаллургические методы переработки.

Ключевые слова: черная металлургия, шлак, сталеплавильное производство, десульфурация, дефосфорация

Для цитирования: Бельский С. С., Зайцева А. А., Тютрин А. А., Исмоилов З. З., Баранов А. Н., Сокольников Ю. В. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 782–794. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>.

Current state of steelmaking slag processing

Sergey S. Belskii¹, Anna A. Zaitseva², Andrey A. Tyutrin³✉,
Zulfikar Z. Ismoilov⁴, Anatoly N. Baranov⁵, Yuliya V. Sokolnikova⁶

¹⁻⁶Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

⁶Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

¹bss@istu.edu

²vo1odkinaa@yandex.ru

³an.tu@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

⁴chipa10@yandex.ru

⁵baranov@istu.edu

⁶jsokol1@yandex.ru

Abstract. In the present work, the properties and composition of steelmaking slag are assessed by analysing existing processing methods, including desulfurisation and dephosphorisation. The atomic absorption and optical emission methods were used to study the chemical composition of slag samples, and metallographic analysis was used to study their microstructure. Major approaches to processing slags applied in Russia and abroad were studied. It was shown that steelmaking slags are neutralised and treated by various methods and subsequently applied in construction and road industries, while the obtained phosphorus-containing products are used in agriculture instead of superphosphate. In addition, these products reduce lime consumption and improve slag formation in steelmaking. The key factor hampering reusing electric steelmaking and converter slags for metal refining is shown to be the presence of phosphorus. The chemical composition of slag samples from the electric steelmaking production was analysed; the iron content amounted to 33.2 wt%, calcium – 19.15 wt%, phosphorus – 0.33 wt% and silicon – 5.39 wt%. Iron is present in the oxidised form (FeO, Fe₂O₃ and Fe₃O₄), silicon and calcium in the form of dicalcium silicate (2CaO · SiO₂), phosphorus in the form of calcium silicophosphate having complex composition – Ca₂(SiO₄)₆(Ca₃(PO₄)₂). Phosphorus is fed to the melting units with gangue minerals, agglomerate, ore and fluxes. When the slags are reused, phosphorus returns to the metal, thus contaminating the final product. Possible methods for extracting phosphorus from steelmaking slags include magnetic and electrostatic separation, gravity and flotation concentration, as well as hydrometallurgical processing.

Keywords: ferrous metallurgy, slag, steelmaking, desulfurization, dephosphorization

For citation: Belskii S. S., Zaitseva A. A., Tyutrin A. A., Ismoilov Z. Z., Baranov A. N., Sokolnikova Yu. V. Current state of steelmaking slag processing. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):782-794. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-782-794>.

ВВЕДЕНИЕ

Черная металлургия является одной из видов промышленности, обеспечивающей активное развитие ключевых отраслей мировой экономики, таких как тяжелая, транспортная и оборонная промышленность, все виды строительства и энергетики [1]. По итогам 2019 г. Российская Федерация входит в пятерку стран-лидеров производящих сталь. Объем производства стали российскими предприятиями составил 71,6 млн т⁸.

Деятельность предприятий черной металлургии оказывает значительное антропогенное влияние на окружающую среду – как

близлежащих городов, так и всей страны в целом. Принятие Россией Концепции устойчивого развития обязывает промышленные предприятия снижать экологическое влияние всеми доступными методами [2, 3]. При производстве стали и чугуна образуется значительное количество железосодержащих отходов, не подлежащих вторичному использованию ввиду высокого содержания в них фосфора. Поэтому наблюдается положительная тенденция роста количества исследований, направленных на поиск возможных решений и технологий переработки отходов металлургического производства. Именно

⁸Федаш А. В., Курошев И. С. Производство чугуна и стали // Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / под ред. Д. О. Скобелева. М., Спб.: Изд-во «Реноме», 2019. С. 257–304.

поэтому актуальной проблемой для современных предприятий является модернизация и разработка эколого-экономичных технологий утилизации шлаков и пыли производства стали [4].

Десульфурация и дефосфорация металла являются одними из направлений применения шлаков в твердом и жидком состояниях для рафинирования металла от примесей в качестве частичной замены кальцийсодержащих материалов, таких как известняк и плавиковый шпат. Применение жидких шлаков в сталеплавильном производстве играет важную роль в снижении энергетических потерь при производстве металла. Поэтому оценка процессов использования шлаковых расплавов сталеплавильного передела с позиций энерго- и ресурсосбережения является весьма актуальной [5, 6].

ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА ШЛАКОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В зависимости от металлургического процесса и типа используемого оборудования можно выделить следующие виды шлаков черной металлургии: сталеплавильные (электроплавильные, конвертерные, мартенов-

ские); ферросплавные и ваграночные (рис. 1).

Наибольшим является выход доменных шлаков на 1 т чугуна, который составляет 0,6–0,7 т. При выплавке стали выход на 1 т продукции шлаков значительно меньше: при мартеновском способе – 0,2–0,3 т, бессемеровском и томасовском – 0,1–0,2 т; при выплавке стали в электропечах – 0,1–0,04 т.

В сталеплавильном производстве шлаковый режим является одним из основных определяющих факторов процесса, оказывающих влияние как на качество готовой стали, так и на долговечность футеровки и производительность печи. Шлаковый режим зависит от состава и свойства образующегося шлака, а также его количества. Шлакообразующие компоненты можно разделить на кислотные, основные и амфотерные оксиды. Одним из основных свойств шлака является его кислотность (основность), которая определяется в первую очередь соотношением оксидов кальция и кремния.

По химическому составу металлургические шлаки очень близки к портландцементу, поэтому они часто используются в строительстве, что позволяет расширить выпуск строительных материалов и снизить их стоимость.



Рис. 1. Шлаки черной металлургии
Fig. 1. Ferrous metallurgy slags

В России ежегодно перерабатывается более 2,5 млн т сталеплавильных шлаков, из которых только около 1 млн т отправляют на повторную переработку с целью извлечения из них металла, примерно такое же количество используется в производстве щебня, около 330 тыс. т используют при производстве удобрений, и небольшое количество шлаков утилизируется в производстве шлаковаты [7–10].

Поскольку с каждым днем наблюдается дефицит доменных шлаков, вопросы переработки шлаков сталеплавильного производства приобретают все более существенное значение.

Существует большое количество предлагаемых способов жидкофазного восстановления шлаков сталеплавильного производства [11–19], в основе которых лежит восстановление присутствующих в шлаке оксидов углеродсодержащим восстановителем при температурах свыше 1400°C ⁹.

Сотрудниками Южно-Уральского государственного университета [13] была изучена вероятность жидкофазного восстановления сталеплавильного шлака Златоустовского металлургического завода в печи индукционного нагрева. Средний состав такого шлака имеет следующий вид, % масс.: SiO_2 – 17,7–40,0; CaO – 21,9–47,4; MgO – 6,2–16,5; Al_2O_3 – 7,2–10,1; MnO – 1,2–5,3; Cr_2O_3 – 1,7–11,3; TiO_2 – 0,3–1,5; V_2O_5 – 0,1–0,3; FeO – 3,7–25,0 и NiO – 0,1–0,4. В шихту добавляли кокс в количестве 10% по массе шлака в качестве восстановителя. Полученный продукт содержал 3,5–4,5% масс. углерода, что соответствует легированному чугуна. При этом выход металлической части шлака составил 15–20% от магнитной фракции сталеплавильного шлака.

К полезным действиям шлаков можно отнести их рафинирующее действие для очистки стали от фосфора и серы, которые оказывают негативное воздействие на качество конечной продукции. Кроме того, шлаки спо-

собны защитить металл от окисления газами. Исходя из этого, к шлакам предъявляется ряд требований: шлаки должны обладать высокой рафинирующей способностью и низкой вязкостью, а также практически не оказывать влияния на материалы футеровки печи с точки зрения их совместного химического взаимодействия.

Для рафинирования чугуна известен способ применения синтетического шлака, получаемого из смеси содержащей 40–70% масс. извести; 10–15% масс. алюминиевого порошка; 10–25% масс. плавикового шпата; 10–20% масс. натриевой селитры. Такой способ рафинирования применялся на Алчевском металлургическом комбинате (Луганская обл.) и в ОАО «Тулачермет». Наибольший интерес представляла технология обработки чугуна на желобе доменной печи ОАО «Тулачермет». По данному способу формировали жидкоподвижный высокоосновной малоуглеродистый шлак, обладающий высокой способностью десульфурации [20].

Известен также способ десульфурации чугуна во вращающемся барабане непрерывного действия, который применялся на Енакиевском металлургическом заводе (Донецкая обл.) [21]. По данному способу проводили обработку чугуна шлаком на выпуске из доменной печи.

Также известен способ дефосфорации чугуна, который начали применять в Японии еще с 1983 г. По данному способу сначала производят окислительное рафинирование чугуна от кремния и фосфора, в качестве окислителя применяют кислород, который продувают через расплав, а в качестве флюсов – кусковую известь и сталеплавильный шлак. Далее производят десульфурацию металла порошкообразной кальцинированной содой, инжектируемой через специальную фурму, без удаления шлака.

В Австралии запатентован способ удаления кремния из чугуна с использованием жидких сталеплавильных шлаков, содержа-

⁹ А. с. № 964009, СССР, С22В7/04. Способ рафинирования металла синтетическим шлаком / К. М. Шакиров; заявитель и патентообладатель Сибирский металлургический институт им. Серго Орджоникидзе. Заявл. 31.03.1981; опубл. 07.10. 1982. Бюл. № 37.

щих оксиды железа, где шлаки сливали в промежуточную емкость вместе с жидким чугуном [22].

Известны также способы, по которым осуществляют внепечное рафинирование чугуна с помощью жидких шлаков, согласно которым осуществляется массоперенос компонентов через межфазную границу расплав-шлак. Однако такие способы так и не получили широкого применения в промышленности.

С целью переработки шлаков сталеплавильного производства их вовлекают в различные отрасли промышленности. Так, например, известны технологии, согласно которым из конвертерных шлаков получают абразивные материалы.

Изучена также возможность извлечения из шлака скрапа с использованием дробильно-сортировочных установок. Далее извлеченный скрап разделяют на магнитный и немагнитный, на негабаритный (более 10–15 т), габаритный (0,5–10,0 т) и мелкий (0,25–0,5 т). Отдельно складывается скрап, в котором заметны сплавленные скрапины разных плавок, а также скрапины с большой долей (более 20%) неотделяемого шлака.

Шлак сталеплавильного производства после извлечения скрапа используется в качестве:

- замены суперфосфата (фосфорсодержащие шлаки) в сельском хозяйстве;
- флюсов для ваграночного и аглодоменного производства;
- добавки, повышающей содержание марганца в стали (высокомарганцевые шлаки);
- добавки в сталеплавильном производстве для снижения расхода извести и улучшения шлакообразования;
- заменителя гранитного щебня при производстве бетона и железобетона.

Печной шлак, имеющий основность 1,5–2,0, можно легко переработать на шлаковом дворе в шлаковых ямах с получением фракционированного щебня путем его переработки на дробильно-сортировочной установке, однако для высокоосновного шлака внепеч-

ной обработки с основностью 2,5–4,0 необходимо применение иной технологии переработки, поскольку он имеет другие свойства. Содержащийся в высокоосновном шлаке $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ рассыпается в порошок вследствие полиморфизма кристаллической решетки. Такой шлак трудно перерабатывать и невозможно перевозить из-за пыления. Проблему переработки такого шлака можно решить несколькими способами¹⁰:

– слив шлака на дробленый известняк с получением декарбонизированной шлако-известковой смеси, которую можно использовать в цементной промышленности;

– введение в ковшевой шлак при внепечной обработке стали добавок, которые стабилизируют $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и предотвращают полиморфизм;

– использование ковшевого шлака в качестве частичной замены извести при формировании печного шлака, однако для этого потребуется стабилизация шлака и отработка технологий, которые позволят уменьшить его пылеунос.

Одним из направлений использования шлака является производство строительных материалов, однако на сегодняшний день в данной отрасли используется около 20–30% от всего объема образующегося шлака [24]. За счет высокой прочности и стойкости к выветриванию шлак используют в дорожном строительстве как альтернативу щебню [25, 26]. Электросталеплавильные шлаки также пригодны для использования в цементной промышленности [27–32].

Зарубежные страны с развитой металлургической промышленностью перерабатывают все доменные шлаки и значительную часть сталеплавильных шлаков [33, 34]. К теме утилизации вторичных ресурсов развитые страны относятся исключительно серьезно, в особенности европейские государства – члены Евросоюза [34]. За рубежом сталеплавильные шлаки применяются для известкования почв в сельском хозяйстве, в дорожном строительстве, а также как железосо-

¹⁰ ИТС 26–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство чугуна, стали и ферросплавов. М., 2017. 478 с.

державший материал для вторичной переплавки в доменных печах.

В США, Англии, Франции, Венгрии шлаки перерабатывают в основном для производства щебня из воздушно-охлажденного шлака в траншеях непосредственно у доменных печей или за их пределами. Использование сталеплавильных шлаков в массовом масштабе началось еще с 1967 г. [34, 35].

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ШЛАКОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрим шлаки, образующиеся при производстве стали в ПАО «Северсталь» (рис. 2), которые представляют собой агломераты темно-серого цвета различной крупности до 300–400 мм. В образцах шлака присутствуют скопления металлического железа.

Для исследования элементного химического состава образцов шлаков выполнен химический анализ методами атомно-абсорбционного и оптико-эмиссионного анализа с помощью спектрометров «VARIAN AA 240», «VARIAN AA 240 FS» и «VARIAN 730-ES», а также методами рентгенофлуоресцентного анализа и атомно-эмиссионного с индуктивно связанной плазмой. По результа-

там проведенного анализа образцов шлака электросталеплавильного производства содержание компонентов составило, % масс.: Fe – 33,2; Ca – 19,15; P – 0,33; Si – 5,39; Mn – 4,68; Mg – 2,11; Al – 1,68; Ti – 0,38; Cr – 0,8; Cu – 0,0125.

Для исследования фазового состава образцов был проведен рентгеноструктурный анализ с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu, Япония) с вертикальным θ - θ гониометром. Перед проведением анализа металлическое железо было удалено из проб. Для идентификации фаз использовалась база порошковых дифрактограмм PDF-2. В результате получены данные о фазовом составе сталеплавильного шлака, % масс.: $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ – 45,52; FeO – 28,63; $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)_6(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)$ – 16,77; Fe_2O_3 – 7,88; Fe_3O_4 – 1,20. Как видно из результатов средней пробы, образцы шлака электросталеплавильного производства в основном состоят из силиката кальция $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, фосфор представлен силикофосфатом кальция сложного состава. Железо находится в окисленной форме – FeO, Fe_2O_3 и Fe_3O_4 – с соотношением от общей массы оксидов железа, %: 75,92:20,90:3,18.



Рис. 2. Срез образца электросталеплавильного шлака
Fig. 2. Section of a sample of electric steelmaking slag

Для изучения микроструктуры поверхности изучаемых образцов шлаков был проведен металлографический анализ с предварительной пробоподготовкой образцов, включающей отрезание, заливку смолой, выравнивание и полировку. В результате пробоподготовки были получены образцы шлака электросталеплавильного производства для металлографического анализа (рис. 3).

В результате пробоподготовки были получены образцы шлака электросталеплавильного производства для металлографического анализа (рис. 3).

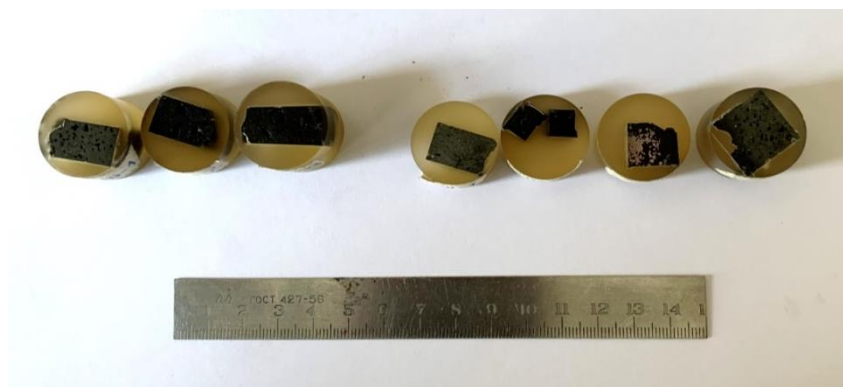


Рис. 3. Общий вид изучаемых образцов шлака после среза и полировки (заливка – акриловая смола марки Struers)
Fig. 3. General view of the studied slag samples after cutting and polishing (Struers acrylic resin is used as a filling)

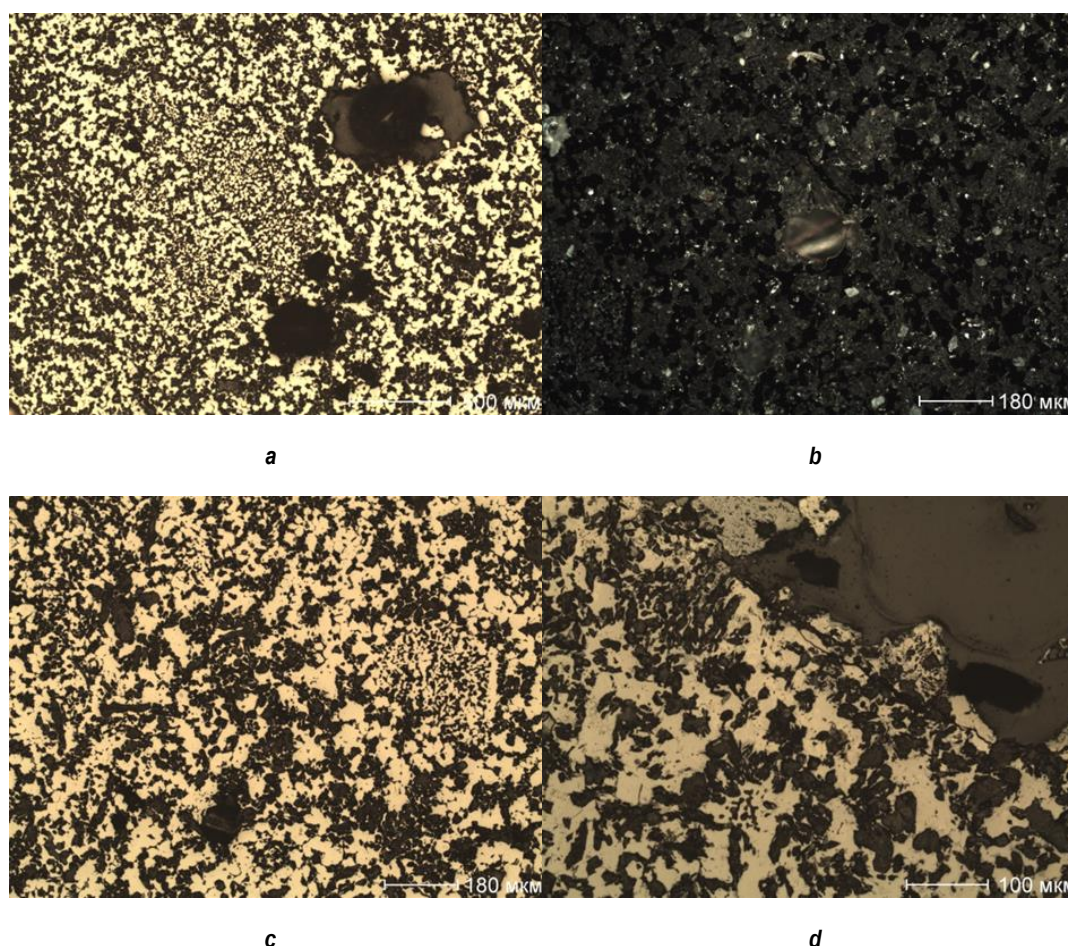


Рис. 4. Микроструктура поверхности шлака электросталеплавильного производства:
a – светлое поле, увеличение 50x; b – темное поле, увеличение 100x; c – светлое поле, увеличение 100x; d – светлое поле, увеличение 200x

Fig. 4. Microstructure of electric steelmaking slag surface: a – light field; 50x magnification; b – dark field, 100x magnification; c – light field, 100x magnification; d – light field, 200x magnification

Микроструктура образцов исследовалась с помощью инвертированного металлографического микроскопа «Olympus GX-51» (Япония). Поверхность шлаков сталеплавильного производства имеет неоднородную мелкозернистую структуру (рис. 4). В образцах наблюдается наличие пор и металлического железа. Светлые области структуры характеризуются преимущественно наличи-

ем оксидов железа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) в присутствии незначительного количества Mn, Mg, Cr. Темные области обогащены силикатом кальция и, в меньшей степени, силикофосфатом кальция, о чем также свидетельствуют результаты рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе JIB-Z4500 (фирма JEOL, Япония) (рис. 5).

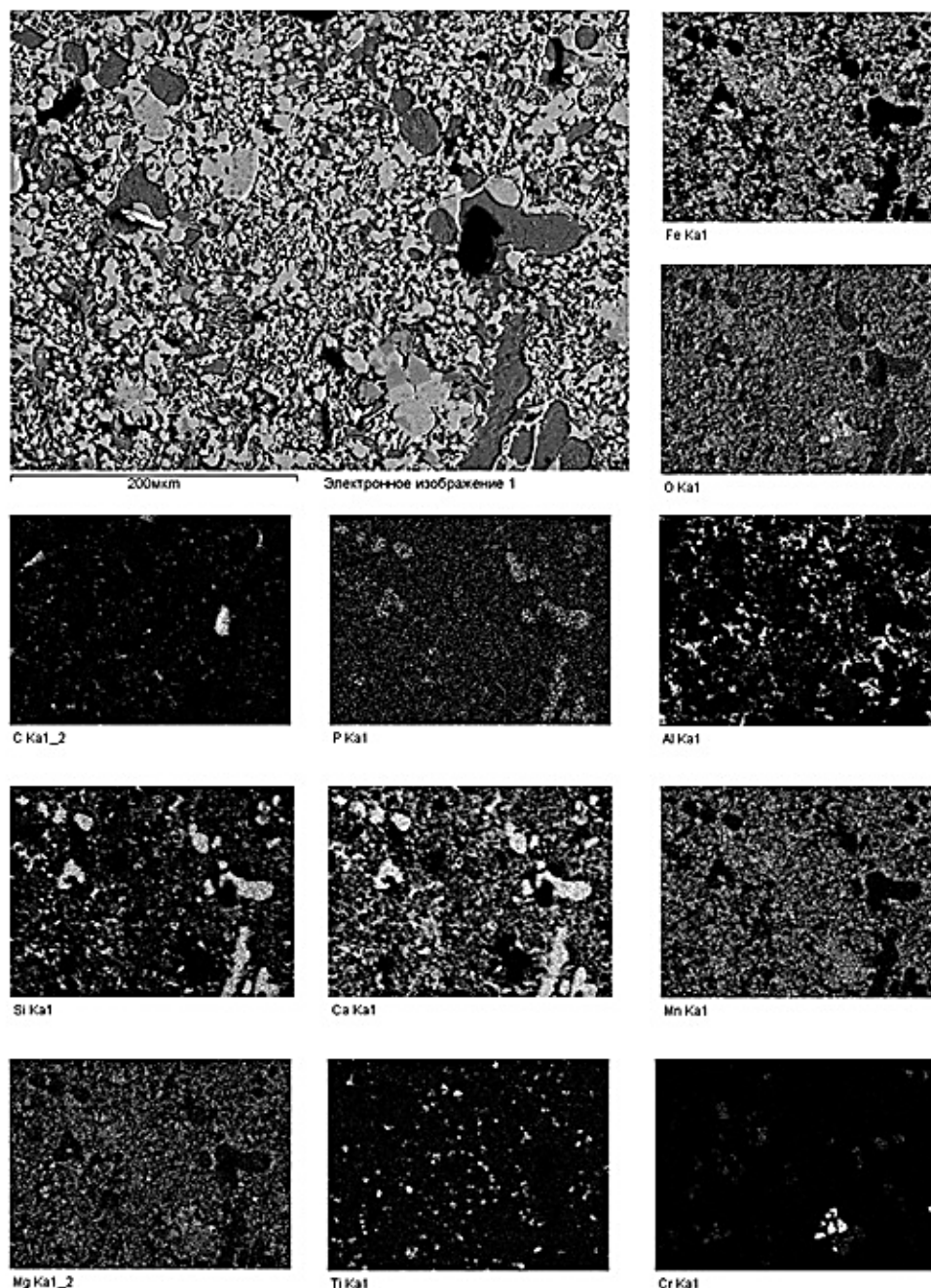


Рис. 5. Результаты рентгеноспектрального микроанализа образца электросталеплавильного шлака по элементам

Fig. 5. Results of X-ray spectral microanalysis of an electric steelmaking slag sample by elements

Одним из основных сдерживающих факторов многократного применения шлаков электросталеплавильного производства для рафинирования металла в качестве источника кальция является накопление фосфора в шлаках. Существуют различные методы извлечения фосфора из шлака: пиро- [18], гидрометаллургические [19, 36, 37] и с использованием физических способов разделения. Наибольший интерес для изучаемых техногенных отходов сталеплавильной промышленности представляют физические и гидрометаллургические способы разделения.

Основными недостатками существующих гидрометаллургических методов извлечения фосфора являются высокие температура процессов и вязкость, а также низкая ликвидность шлака состава CaO-FeO-SiO_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного аналитического обзора можно выделить несколько основных направлений утилизации шлаков сталеплавильного производства: обезвреживание и обработка шлаков различными методами с последующим использованием в строительной и дорожной промышленности,

фосфорсодержащие продукты – в сельском хозяйстве для замены суперфосфата, для снижения расхода извести и улучшения шлакообразования в сталеплавильном производстве.

Одним из основных факторов, сдерживающих многократное применение электросталеплавильного и конвертерного шлаков для рафинирования металла, является накопление в шлаках фосфора, поступающего в печь с минералами, из которых состоит пустая порода, агломератом, рудой, а также с флюсами. При повторном использовании шлаков фосфор возвращается вновь в металл, тем самым загрязняя конечный продукт. Снижение его содержания в металле является важной задачей, поскольку годовые объемы образования шлаков конвертерного производства составляют 114,6–191,8 кг/т продукции, электросталеплавильного – 127–282 кг/т. Возможными направлениями извлечения фосфора из шлаков сталеплавильного производства являются методы магнитной и электростатической сепарации, гравитационного и флотационного обогащения, а также гидрометаллургические методы переработки.

Список источников

1. Shamsuddin M. *Steelmaking // Physical Chemistry of Metallurgical Processes*, Second Edition. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer, 2021. P. 237–292. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58069-8_7.
2. Dildin A. N., Trofimov E. A., Chumanov I. V. Process improvement for liquidphase metal reduction from steelmaking dump slags // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9. Iss. 47. P. 132–141. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/109067>.
3. Glushakova O. V., Chernikova O. P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an environmental component of sustainable development of territories. Report 1 // *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. P. 249–256. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040057>.
4. Tyushnyakov S. N., Selivanov E. N. Electromagnetic technology to utilize zinc-containing slags of copper-smelting production and dusts of blast furnace and steelmaking production // *Metallurgist*. 2020. Vol. 64. P. 196–207. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00984-z>.
5. Mori K., Wada H., Pehlke R. D. Simultaneous desulfurization and dephosphorization reactions of molten iron by soda ash treatment // *Metallurgical Transactions B*. 1985. Vol. 16. P. 303–312. <https://doi.org/10.1007/BF02679721>.
6. Yugov P. I., Sarychev A. V., Baeva L. A. Dephosphorization of metal during the conversion of low-manganese pig iron in an oxygen converter // *Metallurgist*. 2001. Vol. 45. P. 379–381. <https://doi.org/10.1023/A:1017976123785>.
7. Шейченко М. С., Лесовик В. С., Алфимова Н. И. Композиционные вяжущие с использованием высокомагнезиальных отходов Ковдорского месторождения // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2011. № 1. С. 10–14.
8. Лесовик В. С., Загороднюк Л. Х., Шахова Л. Д. Техногенные продукты в производстве сухих строительных смесей. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. 196 с.
9. Панфилов М. И., Школьник Я. Ш. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии. М.: Металлургия, 1987. 238 с.
10. Рояк С. М., Пьячев А. В., Школьник Я. Ш. Структура доменных шлаков и их активность // *Цемент*. 1978. № 8. С. 4–5.
11. Patent no. 9650688, United States of America. Method of recovering Fe from steel-making slag / Il. Sohn, Sung Suk Jung; no. 14/228,815. Filed 28.03.2014; publ. 16.05.2017.
12. Сергеев Д. В., Чуманов В. И., Дильдин А. Н., Тро-

- фимов Е. А., Чуманов И. В. Пирометаллургическое восстановление компонентов шлака со шлаковых отвалов сталеплавильного производства // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16. Сателлитная конференция XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии (г. Волгоград, 16–20 мая 2016 г). Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2016. С. 345–347.
13. Shatokhin I. M., Kuz'min A. L., Smirnov L. A., Leont'ev L. I., Bigeev V. A., Manashev I. R. New method for processing metallurgical wastes // *Metallurgist*. 2017. T. 61 No. 7-8. 523–528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.
14. Гимуранова Е. В., Омельчук А. А. Исследование процессов жидкофазного восстановления шлаков сталеплавильного производства в лабораторных условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 3. С. 139–150. <https://doi.org/10.15593/2223-9877/2017.3.08>.
15. Пат. № 2226220, Российская Федерация, С2, МПК C22B7/04. Способ переработки шлаков от производства стали / А. Эдлингер; заявитель и патентообладатель «Хольдербанк» Финансьер Гларус АГ. 2001101876/02. Заявл. 14.04.2000, опублик. 27.03.2004. Бюл. № 9.
16. Patent no. 9469885, United States of America, B2, C22B7/04. Method and apparatus for recovering valuable metals from slag and manufacturing multifunctional aggregate / Joonseong Ki, Jinill Hwang. Filed 29.03.2012; publ. 17.09.2013.
17. Patent no. 8211206, United States of America, B2, C22B7/04. Processing metallurgical slag / A. Mecchi. Filed 16.10.2008; publ. 03.07.2012.
18. Dosmukhamedov N., Egizekov M., Zholdasbay E., Kaplan V. Metal recovery from converter slags using a sulfiding agent // *JOM*. 2018. Vol. 70. P. 2400–2406. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3093-8>.
19. Cui Su Ping, Wang Xue Li, Wang Jian Feng, Liu Hui. Extraction of the RO Phase from Steel Slag // *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 898. P. 2470–2475. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.2470>.
20. Дюдкин Д. А., Кисиленко В. В. Производство стали // Внепечная обработка жидкого чугуна. Т. 2. М.: Изд-во «Теплотехник», 2008. 400 с.
21. Журавлев В. М., Югов П. И., Есипенко И. И. Новая технология десульфурации чугуна с многократным использованием вторичного металлургического сырья // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2000. № 1. С. 52–53.
22. Поживанов М. А. Внепечная металлургия чугуна. Киев: Изд-во ФТИМС НАНУ, 2006. 78 с.
23. Дильдин А. Н., Чуманов И. В., Чуманов В. И., Еремашев В. Е., Трофимов Е. А., Кирсанова А. А. Жидкофазное восстановление отходов сталеплавильного производства // *Металлург*. 2015. № 11. С. 34–38.
24. Шаповалов Н. А., Загороднюк Л. Х., Тикунова И. В., Шекина А. Ю. Рациональные пути использования сталеплавильных шлаков // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 1-2. С. 439–443.
25. Панковец А. И., Мироевский С. В. Утилизация электросталеплавильных шлаков // *Литье и металлургия*. 2013. № 1. С. 26–27.
26. Patent no. 6334885, United States of America, B1. Method of solidifying steel-making slag and material produced by the method / Y. Fukushima, H. Matsunaga, H. Tobo, M. Nakagawa, M. Takagi, M. Kumagai. 2002. Filed 13.10.1999; publ. 01.01.2002.
27. Хаматова А. Р., Хохлаков О. В. Электросталеплавильный шлак ОАО «Ижсталь» для цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 2. С. 221–227.
28. Tsakiridis P. E., Papadimitriou G. D., Tsvilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 152. Iss. 2. P. 805–811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.
29. Patent no. 201610570916, China, XA. Mixed slag smelting reduction production and thermal refining method / Chzhan Wu. Filed 18.07.2016; publ. 04.05.2018.
30. Patent no. 6391086, United States of America, B1. Method for the use of electric steel plant slag for self-reducing agglomerates / M. Albuquerque Contrucci, E. S. Marcheze. Filed 20.03.2001; publ. 30.10.2002.
31. Patent no. 6033467, United States of America, A. Method of making cement or mine backfill from base metal smelter slag / D. Krofchak. Filed 8.05.1998; publ. 07.03.2000.
32. Patent no. 5944870, United States of America, A. Method of manufacturing pig iron or steel and cement clinker from slags / A. Edlinger. Filed 07.02.1995; publ. 07.02.2016.
33. Юнг В. Н. Технология вяжущих веществ. М.: Гос. изд-во лит-ры по строительным материалам, 1952. 560 с.
34. Ласкорин Б. Н. Проблемы развития безотходных производств. М.: Изд-во «Стройиздат», 1981. 207 с.
35. Лесовик В. С., Агеева М. С., Иванов А. В. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 29–32.
36. Patent no. 4225565, United States of America, A. Process for treating waste slags / K. Marukawa, S. Okamoto, K. Yamada, M. Iba. Filed 30.09.1980; publ. 25.01.1999.
37. Patent no. 3275848, Japan, A4. Method for recovering calcium-containing solid component from steelmaking slag and recovered solid component / Ya. Fukui, A. Asaba, S. Matsuo, M. Yamamoto. Filed 16.03.2016; publ. 17.10.2018.

References

1. Shamsuddin M. Steelmaking. In: *Physical Chemistry of Metallurgical Processes, Second Edition. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2021, p. 237-292. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58069-8_7.
2. Dildin A. N., Trofimov E. A., Chumanov I. V. Process improvement for liquidphase metal reduction from steelmaking dump slags. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016;9(47):132-141. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/109067>.
3. Glushakova O. V., Chernikova O. P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an environmental component of sustainable development of territories. Report 1. *Steel in Translation*. 2021;51:249-256. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040057>.
4. Tyushnyakov S. N., Selivanov E. N. Electromagnetic technology to utilize zinc-containing slags of copper-smelting production and dusts of blast furnace and steelmaking production. *Metallurgist*. 2020;64:196-207. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00984-z>.
5. Mori K., Wada H., Pehlke R. D. Simultaneous desulfurization and dephosphorization reactions of molten iron by soda ash treatment. *Metallurgical Transactions B*. 1985;16:303-312. <https://doi.org/10.1007/BF02679721>.
6. Yugov P. I., Sarychev A. V., Baeva L. A. Dephosphorization of metal during the conversion of low-manganese pig iron in an oxygen converter. *Metallurgist*. 2001;45:379-381. <https://doi.org/10.1023/A:1017976123785>.
7. Sheychenko M. S., Lesovik V. S., Alfimova N. I. Composite binders including high-magnesium waste from the Kovdorskoye deposit. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova*. 2011;1:10-14. (In Russ.).
8. Lesovik V. S., Zagorodnyuk L. H., Shahova L. D. *Technogenic products in manufacturing of dry building mixes*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; 2011, 196 p. (In Russ.).
9. Panfilov M. I., Shkolnik Ya. Sh. *Slag processing and waste-free technology in metallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1987, 238 p. (In Russ.).
10. Rojak S. M., Pyachev A. V., Shkol'nik Ya. Sh. Structure of blast furnace slags and their activity. *Tsement*. 1978;8:4-5. (In Russ.).
11. Sohn Il., Jung Sung Suk. *Method of recovering Fe from steel-making slag*. Patent US, no. 9650688; 2017.
12. Sergeev D. V., Chumanov V. I., Dil'din A. N., Trofimov E. A., Chumanov I. V. Pyrometallurgical recovery of slag components from steelmaking production slag dumps. In: *V Mezhdunarodnaya konferenciya-shkola po himicheskoy tekhnologii HT'16. Satellitnaya konferenciya HH Mendelevskogo s'ezda po obshchej i prikladnoj himii = V International School-Conference on Chemical Technology ChT'16. Satellite conference of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. 16–20 May 2016, Volgograd. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2016, p. 345-347. (In Russ.).
13. Shatokhin I. M., Kuz'min A. L., Smirnov L. A., Leont'ev L. I., Bigeev V. A., Manashev I. R. New method for processing metallurgical wastes. *Metallurgist*. 2017;61(7-8):523-528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.
14. Gimuranova E. V., Omelchuk A. A. Investigation of liquid-phase reduction of steelmaking slag in the laboratory. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*. 2017;19(3):139-150. <https://doi.org/10.15593/2223-9877/2017.3.08>.
15. Edlinger A. *Processing method of steelmaking slags*. Patent RF, no. 2226220; 2004. (In Russ.).
16. Ki Joonseong, Hwang Jinill. *Method and apparatus for recovering valuable metals from slag and manufacturing multifunctional aggregate*. Patent US, no. 9469885; 2013.
17. Mecchi A. *Processing metallurgical slag*. Patent US, no. 8211206; 2012.
18. Dosmukhamedov N., Egizekov M., Zholdasbay E., Kaplan V. Metal recovery from converter slags using a sulfiding agent. *JOM*. 2018;70:2400-2406. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3093-8>.
19. Cui Su Ping, Wang Xue Li, Wang Jian Feng, Liu Hui. Extraction of the RO phase from steel slag. *Materials Science Forum*. 2017;898:2470-2475. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.2470>.
20. Dyudkin D. A., Kisilenko V. V. Steel production. *Ladle treatment of liquid cast iron*. Vol. 2. Moscow: Teplotekhnika; 2008, 400 p. (In Russ.).
21. Zhuravlev V. M., Yugov P. I., Esipenko I. I. New technology for cast iron desulfurization with repeated use of secondary metallurgical raw materials. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii = Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2000;1:52-53. (In Russ.).
22. Pozhivanov M. A. *Secondary metallurgy of cast iron*. Kiev: Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine; 2006, 78. (In Russ.).
23. Dil'din A. N., Chumanov I. V., Chumanov V. I., Eremyashev V. E., Trofimov E. A., Kirsanova A. A. Liquidphase recovery of steelmaking wastes. *Metallurg*. 2015;11:34-38. (In Russ.).
24. Shapovalov N. A., Zagorodnyuk L. H., Tikunova I. V., Shchekina A. Yu. Rational way to use steel slag. *Fundamental'niye issledovaniya = Fundamental Research*. 2013;1-2:439-443. (In Russ.).
25. Pankovets A. I., Miroevsky S. V. Utilization of electric steelmaking slags. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2013;1:26-27. (In Russ.).
26. Fukushima Y., Matsunaga H., Tobo H., Nakagawa M., Takagi M., Kumagai M. *Method of solidifying steel-making slag and material produced by the method*. Patent US, no. 6334885; 2002.
27. Khamatova A. R., Khohryakov O. V. The electro-steel-smelting slag JSC "Izhstal" for cements of low water demand and concrete on their basis. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = News of the KSUATE*. 2016;2:221-227. (In Russ.).
28. Tsakiridis P. E., Papadimitriou G. D., Tsivilis S., Koro-

neos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;152(2):805-811.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.

29. Wu Chzhan. *Mixed slag smelting reduction production and thermal refining method*. Patent of China, no. 201610570916; 2018.

30. Albuquerque Contrucci M., Marcheze E. S. *Method for the use of electric steel plant slag for self-reducing agglomerates*. Patent US, no. 6391086; 2002.

31. Krofchak D. *Method of making cement or mine backfill from base metal smelter slag*. Patent of US, no. 6033467; 2000.

32. Edlinger A. *Method of manufacturing pig iron or steel and cement clinker from slags*. Patent US, no. 5944870; 2016.

33. Jung V. N. *Technology of binders*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'nym materialam; 1952, 560 p. (In Russ.).

34. Laskorin B. N. *Issues of waste-free production development*. Moscow: Stroybzdat; 1981, 207 p. (In Russ.).

35. Lesovik V. S., Ageev M. S., Ivanova A. V. Granulated slags in the production of composite binders. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova*. 2011;3:29-32. (In Russ.).

36. Marukawa K., Okamoto S., Yamada K., Iba M. *Process for treating waste slags*. Patent US, no. 4225565; 1999.

37. Fukui Ya., Asaba A., Matsuo S., Yamamoto M. *Method for recovering calcium-containing solid component from steelmaking slag and recovered solid component*. Patent Japan, no. 3275848; 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бельский Сергей Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Зайцева Анна Александровна,

ассистент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Тютрин Андрей Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Исмоилов Зулфикор Зафарович,

магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Баранов Анатолий Никитич,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey S. Belskii,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Anna A. Zaitseva,

Assistant Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Andrey A. Tyutrin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Zulfikor Z. Ismoilov,

Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Anatoly N. Baranov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Non-Ferrous Metals
Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Сокольникова Юлия Владимировна,

кандидат химических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
начальник химико-аналитической производственной
лаборатории,
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1/А, Россия

Yuliya V. Sokolnikova,

Cand. Sci. (Chem.),
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
Vinogradov Institute of Geochemistry of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences,
1/A, Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.10.2021; одобрена после рецензирования 18.11.2021; принята к публикации 27.12.2021.

Information about the article

The article was submitted 13.10.2021;; approved after reviewing 18.11.2021; accepted for publication 27.12.2021.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 669.2.8:669.713.76:669.765

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-795-806>

ПироэлектрOMETаллургическая переработка висмутсодержащих оксидов

Алексей Анатольевич Королев^{1✉}, Сергей Вячеславович Сергейченко²,
Константин Леонидович Тимофеев³, Геннадий Иванович Мальцев⁴,
Роман Сергеевич Воинков⁵

^{1,2,4,5} Акционерное общество «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма, Россия

³ Технический университет Уральской горно-металлургической компании, г. Верхняя Пышма, Россия

¹ A.Korolev@elem.ru, orcid.org/0000-0002-0338-9774

² sesv@elem.ru, orcid.org/0000-0002-3786-7957

³ K.Timofeev@elem.ru, orcid.org/0000-0002-9525-6476

⁴ mgi@elem.ru, orcid.org/0000-0002-0750-0070

⁵ R.Voinkov@elem.ru, orcid.org/0000-0001-6697-1596

Резюме. Цель – обоснование и разработка принципиальной пироэлектрOMETаллургической технологии переработки висмутистых дроссов и оксидов – промпродуктов рафинирования черного свинца способом Кролля-Беттертона – с получением висмута черного. Объектом исследований явились висмутистые дроссы (3–5% Bi; 80–85% Pb), переплавляемые при 500–600°C в присутствии NaNO₃ и NaOH. А также полученный щелочной плав – висмутистые оксиды (1–5% Bi; 60–70% Pb). По итогам испытаний определены оптимальные параметры основных операций технологии переработки висмутистых оксидов и характеристики полученных продуктов. Предложена восстановительная плавка при 1150°C висмутистых оксидов (с добавлением карбоната натрия, кварца и коксика, взятых в количестве 66, 25 и 5% от массы висмутистых оксидов), в результате которой образуется висмутистый свинец. Его обезмеживание проводится при 350–600°C при добавлении в расплав серы в количестве до 2,0% от его массы. Щелочную обработку обезмеженного Pb-Bi сплава предложено проводить при 500°C при контактировании с гидроксидом натрия, нитратом натрия и хлоридом натрия, взятыми в количестве до 10,2, до 8,3 и до 1,4% от массы висмутистого свинца. Последующий электролиз заключается в электролитической переработке при 550°C слитков Pb-Bi сплава, очищенного от примесей. Электролитом служит расплав следующего состава, %: NaCl – 7, KCl – 35, PbCl₂ – 18, ZnCl₂ – 40. В результате предложенной технологии переработки висмутовых оксидов были получены два конечных продукта. Анодный продукт второй стадии электролиза – черновой висмут (при выходе составил 1,1% от оксидов) – содержал 93,62% Bi и 4,14% Pb, извлечение из оксидов – 19,0% Bi и 0,1% Pb. В катодный продукт (выход составил 5,1% от оксидов), содержащий 0,033% Bi и 97,83% Pb, переходит около 1,2% Bi и 9,1% Pb от их первоначального содержания в оксидах.

Ключевые слова: рафинирование, висмутсодержащие оксиды, сплав свинцово-висмутовый, восстановительная плавка, обезмеживание висмутистого свинца, оборотный шлак

Для цитирования: Королев А. А., Сергейченко С. В., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С. ПироэлектрOMETаллургическая переработка висмутсодержащих оксидов // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 795–806. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-795-806>.

Pyroelectrometallurgical processing of bismuth-containing oxides

Aleksey A. Korolev^{1✉}, Sergey V. Sergeichenko², Konstantin L. Timofeev³,
Gennady I. Maltsev⁴, Roman S. Voinkov⁵

^{1,2,4,5} Joint Stock Company Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia

³ Technical University of the Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

¹ A.Korolev@elem.ru, orcid.org/0000-0002-0338-9774

² sesv@elem.ru, orcid.org/0000-0002-3786-7957

³ K.Timofeev@elem.ru, orcid.org/0000-0002-9525-6476

⁴ mgi@elem.ru, orcid.org/0000-0002-0750-0070

⁵ R.Voinkov@elem.ru, orcid.org/0000-0001-6697-1596

Abstract. In this work, we substantiate and develop a general pyroelectrometallurgical technology for processing bismuth dross and oxides (the intermediate products of lead bullion refining by the Betterton-Kroll process) to obtain crude bismuth. The research focuses on bismuth dross (3–5% Bi; 80–85% Pb) remelted at 500–600°C in the presence of NaNO₃ and NaOH, as well as the obtained alkaline melt (bismuth oxides, 1–5% Bi; 60–70% Pb). The conducted experiments allowed us to determine optimal parameters of the main steps of processing bismuth oxide, as well as the characteristics of obtained products. Reduction smelting of bismuth oxides at 1150°C (with the addition of sodium carbonate, quartz and fine coke in the amount of 66, 25 and 5% of bismuth oxides mass, respectively) is proposed, leading to bismuth lead formation. Its decoppering is carried out at 350–600°C with 2.0% sulfur (by its weight), added to the melt. We propose to carry out the alkaline treatment of the decoppered Pb-Bi alloy at 500°C in contact with sodium hydroxide, sodium nitrate and sodium chloride, taken in amounts up to 10.2, 8.3 and 1.4% by weight of bismuth lead, respectively. Subsequent electrolysis comprises electrolytic processing of purified Pb-Bi alloy ingots at 550°C. The electrolyte consists of a melt with the following composition, %: NaCl – 7, KCl – 35, PbCl₂ – 18 and ZnCl₂ – 40. As a result, two end products were obtained by the proposed bismuth oxide processing. The anodic product at the second stage of electrolysis, crude bismuth (yielded 1.1% by the weight of oxides) contains 93.62% Bi and 4.14% Pb, extraction from oxides amounts to 19.0% Bi and 0.1% Pb. About 1.2% Bi and 9.1% Pb of their initial content in the oxides are transferred to the cathodic product containing 0.033% Bi and 97.83% Pb (the yield equalled 5.1% of the oxides).

Keywords: refining, bismuth-containing oxides, lead-bismuth alloy, reducing melting, decontamination of bismuth lead, return slag

For citation: Korolev A. A., Sergeichenko S. V., Timofeev K. L., Maltsev G. I., Voinkov R. S. Pyroelectrometallurgical processing of bismuth-containing oxides. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):795-806. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-795-806>.

ВВЕДЕНИЕ

Для компенсации недостатка кондиционного сырья при получении цветных металлов большое внимание уделяется разработке новых и оптимизации существующих технологий переработки ранее неиспользованных промежуточных продуктов и промышленных отходов для получения товарных продуктов^{6,7} [1–5]. При рафинировании черного свинца пирометаллургическим методом в филиале «Производство сплавов цветных металлов» (ПСЦМ) АО «Уралэлектромедь» предусмотрено удаление висмута посредством введения в расплав кальция и магния

– способ Кролля–Беттертона [6–8]. При этом образуются висмутистые дросты (Bi – 3–5%; Pb – 80–85%), которые переплавляют при температуре 500–600°C в присутствии NaNO₃ и NaOH. Полученный щелочной плав, содержащий висмутистые оксиды (Bi – 1–5%; Pb – 60–70%), перерабатывают в процессе рафинирования свинца, а образующиеся свинцово-висмутистые сплавы (Bi – 1–12%), соответствующие маркам ССВ-1, ...ССВ-12, реализуются как товарная продукция. Использование указанной технологии предусматривает постоянный оборот висмутистых оксидов и накопление целевых металлов в производ-

⁶ Эмели Дж. Элементы: справочник. М.: Мир, 1993. 256 с.

⁷ Федоров П. И. Химия и технология малых металлов. Висмут и кадмий: учеб. пособ. М.: Изд-во МИХМ, 1986. 92 с.

ственном цикле. Кроме того, низкое содержание висмута в составе Pb-Bi сплавов ограничивает сферу их использования и, соответственно, потребительский спрос. Актуальным становится вопрос расширения номенклатуры предлагаемой товарной продукции, предусматривающей получение более сбалансированных по содержанию исходных компонентов бинарных Pb-Bi сплавов с повышенной стоимостью реализации.

Из литературных данных известны различные способы получения черного висмута, изначально содержащегося в составе висмутистых дрессов и оксидов: пирометаллургические [9–11], гидрометаллургические [12–14], пироэлектрометаллургические [15–17], гидроэлектрометаллургические [18–20]. С учетом действующего технологического цикла в филиале ПСЦМ АО «Уралэлектромедь» перспективным представляется использование электрометаллургической технологии, которая может быть реализована посредством двух основных производственных схем.

В первом случае используется гидроэлектрометаллургический способ, предусматривающий следующие основные операции:

- восстановительная плавка оксидов в присутствии карбоната натрия, кварца и коксика (полученный шлак утилизируют в медеплавильном производстве);
- возврат образующейся пыли в плавку;
- отливка анодов из висмутистого свинца;
- электролиз висмутистого свинца в кремнефтористом растворе (с получением обратного катодного свинца и анодного шлама);
- промывка, сушка и плавка обратного шлама в смеси с углем и содой, в результате чего получены утилизируемый отвальный шлак и слитки черного висмута [21].

Во втором случае реализуется пироэлектрометаллургический способ, включающий:

- восстановительную плавку оксидов (получены шлак, пыли и слитки висмутистого свинца);
- электролиз висмутистого свинца в рас-

плавке хлоридов (получены катодный свинец и обогащенный висмутистый свинец);

- вторичный электролиз висмутистого свинца (получены катодный свинец и товарный черновой висмут) [22].

Из оксидных соединений, в частности дрессов, висмут может быть получен восстановительной плавкой в расплаве едкого натра, элементной серы и коксика, взятых в соотношении: висмут:щелочь:уголь:сера = 1:(0,8–1,8):(0,04–0,16):(0,02–0,08)⁸. При низкотемпературной (800–850°C) восстановительной плавке для получения черного висмута в состав шихты вводят крахмал, позволяющий повысить прямое извлечение висмута до ~95% [23].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование и разработка принципиальной пироэлектрометаллургической технологии переработки висмутистых дрессов и оксидов – промпродуктов рафинирования черного свинца – применительно к производственной инфраструктуре филиала ПСЦМ АО «Уралэлектромедь» при использовании восстановительных плавов исходного сырья и обогащенного висмутом шлама, электролизом висмутистого свинца с получением висмута черного, содержащего не менее 90% Bi при его прямом извлечении не менее 70%.

Решаемыми для достижения цели исследования задачами являются: оценка вещественного состава исходных висмутистых оксидов, дрессов и полученных продуктов; экспериментальное моделирование базового передела схемы – плавки оксидов с добавлением карбоната натрия, диоксида кремния и углеродистого восстановителя; обоснование основных переделов предложенной технологической схемы [1, 4].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены опыты по воспроизведению основных переделов технологии получения висмута черного с увеличенными (до 1,1–1,2 кг) навесками исходных висмутистых ок-

⁸А. с. № 1106162, СССР, С22В 30/06. Способ получения висмута из его оксисоединений / Ю. М. Юхин, В. Е. Дьяков, Л. Н. Максимов, А. И. Федченко, В. В. Соболев; заявитель Институт химии твердого тела и переработки минерального сырья СО АН. Заявл. 27.06.1983; опубл. 10.11.2011. Бюл. № 31.

сидов в выявленных ранее технологических режимах. Восстановительную плавку висмутистых оксидов с получением висмутистого свинца вели при температуре 1150°C и следующем расходе реагентов, % от количества оксидов: Na_2CO_3 – 66; SiO_2 – 25; С – 5. Реагентная обработка висмутистого свинца с получением Pb-Bi сплава, очищенного от примесей, включала обезмеживание (охлаждение от 600°C) и щелочную обработку (500°C) полученного обезмеженного сплава. Расход реагентов составил, % от висмутистого свинца: S – 2,0; NaNO_3 – 10,2; NaOH – 8,3; NaCl – 1,4. Пирозлектromеталлургическая переработка (550°C) Pb-Bi сплава в расплаве смеси солей (%: NaCl – 7, KCl – 35, PbCl_2 – 18, ZnCl_2 – 40) с получением висмута чернового проведена в две стадии.

На первой стадии исходный Pb-Bi сплав обрабатывали анодной поляризацией при анодной плотности тока 0,5 А/см², токовой нагрузке 9,3–9,9 А. На второй стадии обогащенный по висмуту сплав (анодный продукт первой стадии) подвергали анодной поляризации при скорректированном режиме: анодная плотность тока составила 0,3 А/см², токовая нагрузка – 8,0 А.

Для изучения элементного состава исходных материалов и продуктов пирозлектromеталлургической переработки висмутистых оксидов навески испытуемых образцов измельчали в лабораторном истирателе марки DP50 до крупности менее 0,1 мм [3].

Химический состав анализируемых компонентов определен методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (Optima 4300 DV) и рентгенофлуоресцентной спектроскопии (S4 Explorer).

Фазовый состав оценен методом рентгенофазового анализа на автоматизированном дифрактометре ДРОН-2 в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении, последующая идентификация фаз проведена с привлечением базы данных ICDD 2013. Для определения элементного состава фаз использован растровый электронный микроскоп JSM-5900LV со встроенным энергодисперсионным рентгеновским спектрометром OXFORD INCA Energy 200.

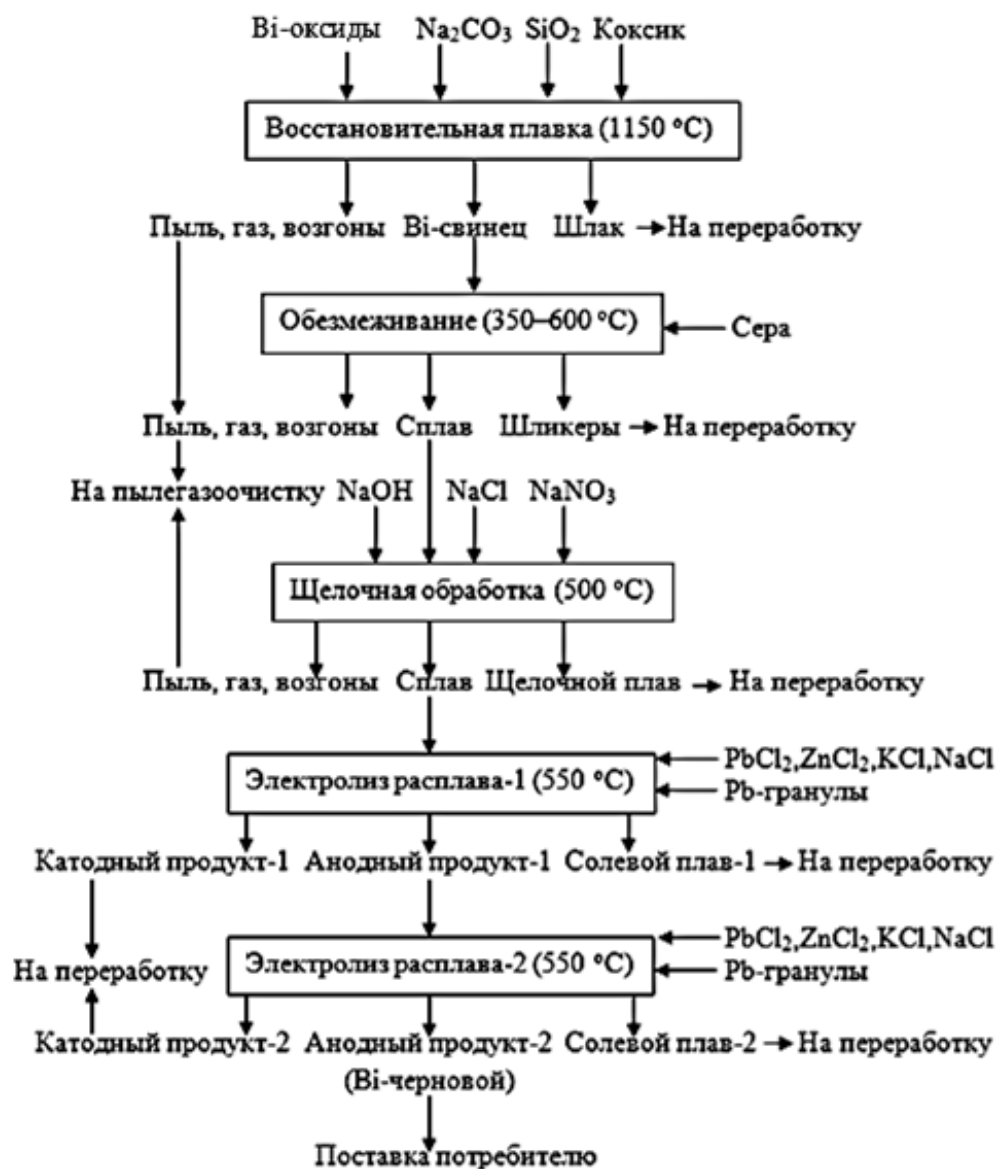
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам испытаний технологии переработки висмутистых оксидов (рисунок) определены оптимальные параметры основных операций и характеристики полученных продуктов (табл. 1–5).

Восстановительная плавка осуществляется при температуре 1150°C висмутистых оксидов с добавлением карбоната натрия, кварца и коксика, взятых в количестве 66, 25 и 5% от массы висмутистых оксидов, соответственно, в результате которой выделяются: висмутистый свинец, оборотный шлак, передаваемый в цикл переработки Cu- или Pb-содержащего сырья (минерального или вторичного), и пылегазовая смесь, подвергаемая пылегазоочистке с получением пыли и возгонов, передаваемых в цикл переработки Cu- или Pb-содержащего сырья, и очищенного газа, выбрасываемого в атмосферу [22, 23].

Выделенный висмутистый свинец (выход – 70,0%) содержит, %: Bi – 7,33; Pb – 76,70. Извлечение металлов в сплав, %: Bi – 96,0; Pb – 97,2. Шлак (выход – 83,0%) состава, %: Bi – 0,18; Pb – 1,32; SiO_2 – 24,0; Na_2O – 55,6; MgO – 7,7; CaO – 6,9; FeO – 0,5. В него переходит, %: Bi – 2,8; Pb – 2,0. Третьим продуктом плавки является пылегазовая смесь (выход – 43,0 %), концентрирующая часть ценных компонентов, в том числе, %: Bi – 1,2; Pb – 0,8 (см. табл. 1).

Обезмеживание висмутистого свинца при температуре 350–600°C проводится добавлением в расплав серы в количестве до 2,0% от его массы. Выделяемые продукты: сульфидные шликеры, направляемые в цикл переработки Cu- или Pb-содержащего сырья; Pb-Bi сплав после обезмеживания и пылегазовая смесь, подвергаемая пылегазоочистке с получением пыли и возгонов, передаваемых в цикл переработки Cu- или Pb-содержащего сырья, и очищенного газа, выбрасываемого в атмосферу (см. табл. 2). В количестве 37,2% от оксидов выделен обезмеженный сплав, %: Bi – 7,75; Pb – 87,96. Аккумулирующий, %: Bi – 54,0; Pb – 59,3. В сульфидные шликеры (выход – 32,4%) извлекается, %: Bi – 33,3; Pb – 37,1. При содержании, %: Bi – 5,49 и Pb – 63,25.



Технологическая схема получения висмута чернового
Process flow diagram of rough bismuth production

Таблица 1. Восстановительная плавка висмутистых оксидов

Table 1. Reducing melting of bismuth oxides

Компонент	Всего, г	Масса (m, г) / Содержание (β, %) / Распределение (ε, %)		
		m / β / ε		β
		Bi	Pb	Zn/Sb/As/Sn/Cu
Загружено				
Ві-оксиды	1136	60,7/5,3/100	627/55,2/100	6,4/2,4/1,7/1,6/0,3
Сода	750	–	–	–
Кварц	284	–	–	–
Графит	57	–	–	–
ИТОГО:	2227	60,7/–/100	627/–/100	–
Получено				
Ві-свинец	795	58,3/7,3/96	610/76,7/97,2	0,1/2,9/0,3/0,8/0,4
Шлак	943,5	1,7/0,2/3	12,5/1,3/2	5,9/0,25/1,0/0,8/0,02
Пыль, газ	488,5	0,7/0,15/1	5/1/0,8	–
ИТОГО:	2227	60,7/–/100	627/–/100	–

Таблица 2. Обезмеживание Pb-Bi сплава
Table 2. Pb-Bi alloy decontamination

Компонент	Всего, г	Масса (m, г) / Содержание (β, %) / Распределение (ε, %)		
		m / β / ε		β
		Bi	Pb	Zn/Sb/As/Sn/Cu
Загружено				
Ві-свинец	795	58/7,3/100	610/76,7/100	0,1/2,9/0,3/0,8/0,4
Сера	16			–
ИТОГО:	811	58/–/100	610/–/100	–
Получено				
Pb-Вісплав	423	33/7,8/56	372/88/61	–/3/0,3/0,4/0,2
S-шликеры	368	20/5,5/35	233/63/38	0,5/1,8/0,2/1,5/1,4
Пыль, газ	20	5/26,5/9	5/25/0,8	–
ИТОГО:	811	58/–/100	610/–/100	–

Щелочная обработка обезмеженного сплава осуществляется при температуре 500°C путем контактирования с гидроксидом натрия, нитратом натрия и хлоридом натрия, взятыми в количестве до 10,2, до 8,3 и до 1,4% от массы висмутистого свинца, соответственно, при которой образуются: щелочной плав, утилизируемый в цикле рафинирования свинца; Pb-Bi сплав, очищенный от примесей; пылегазовая смесь, подвергаемая пылегазоочистке с получением пыли и возгонов, передаваемых в цикл переработки Си или Pb-содержащего сырья; очищенный газ, выбрасываемый в атмосферу (см. табл. 3).

Сплав после щелочной обработки имеет следующие параметры: выход – 12,5%; состав, %: Bi – 8,7; Pb – 91,0. Извлечение, %: Bi – 20,4; Pb – 20,6. В щелочной плав (выход – 29,0%) переходит, %: Bi – 19,5; Pb – 30,1. Содержание металлов составляет, %: Bi – 3,6; Pb – 57,3. Пыль и газ, образующиеся в ходе

обезмеживания и щелочной обработки (выход – 11,4%), аккумулируют, %: Bi – 22,7; Pb – 9,4.

Процессу электролиза предшествует приготовление хлоридного электролита следующего состава, %: NaCl – 7, KCl – 35, PbCl₂ – 18, ZnCl₂ – 40, заключающееся в смешении и расплавлении заданных количеств хлорида натрия, хлорида калия, хлорида свинца и хлорида цинка [7–9].

Первая стадия электролиза заключается в электролитической переработке при температуре 550°C слитков Pb-Bi сплава, очищенного от примесей, проводимая в расплаве хлоридного электролита. Продукты передела: солевой плав-1, в плановом количестве выводимый в цикл переработки Си- или Pb-содержащего сырья; катодный продукт-1, передаваемый в цикл рафинирования свинца; анодный продукт-1 (см. табл. 4).

Таблица 3. Щелочная обработка Pb-Bi сплава
Table 3. Alkaline treatment of Pb-Bi alloy

Компонент	Всего, г	Масса (m, г) / Содержание (β, %) / Распределение (ε, %)		
		m / β / ε		β
		Bi	Pb	Zn/Sb/As/Sn/Cu
Загружено				
Pb-Bi сплав	423	33/7,8/100	372/88/100	-/3/0,3/0,4/0,2
Нитрат натрия	81	-	-	-
NaOH	66	-	-	-
NaCl	11	-	-	-
ИТОГО:	581	33/-/100	372/-/100	-
Получено				
Pb-Bi сплав	142	12,4/8,7/37,8	129,5/91/35	-/-/-/-/0,16
Щелочной плав	329	11,9/3,6/36	188,7/57,3/51	0,04/2,8/0,3/0,4/0,2
Пыль, газ	110	8,5/7,8/26	53,8/49/14,5	-
ИТОГО:	581	33/-/100	372/-/100	-

Таблица 4. Первая стадия электролиза
Table 4. The first stage of electrolysis

Компонент	Всего, г	Масса (m, г) / Содержание (β, %) / Распределение (ε, %)		
		m / β / ε		β
		Bi	Pb	Zn/Sb/As/Sn/Cu
Загружено				
Pb-Bi сплав	142	12,4/8,7/100	129,5/91/65,7	–/–/–/0,16
Смесь солей	355	–	47,6/13,4/24,1	19,8/–/–/–
Pb-гранулы	20	–	20/100/10,2	–
ИТОГО:	517	12,4/–/100	197,1/–/100	–
Получено				
Анодный продукт-1	44	11,7/26,7/94,2	32,1/73,1/16,3	0,08/–/–/0,13
Катодный продукт-1	105	0,01/0,005/0,04	102,2/97,2/51,8	2,7/–/–/–
Солевой плав-1	368	0,7/0,19/5,7	41,3/11,2/31,9	11,9/–/–/–
ИТОГО:	517	12,4/–/100	197,1/–/100	–

На первой стадии получен анодный продукт-1 (выход – 3,9%), содержащий, %: Bi – 26,7; Pb – 73,1, извлечение металлов, %: Bi – 19,3; Pb – 5,1. В катодный продукт-1 (выход – 9,2%), содержащий, %: Bi – 0,005; Pb – 97,2, переходит 0,01% Bi и 16,3% Pb. Часть висмута и свинца (1,2 и 6,6 %, соответственно) концентрируется в солевом плаве-1 (выход – 32,4 %), содержащем, %: Bi – 0,2; Pb – 11,2.

Вторая стадия электролиза предусматривает электролитическую переработку при температуре 550°C анодного продукта-1 в расплаве хлоридного электролита аналогичного состава. Продукты передела: солевой плав-2, в плановом количестве выводимый в цикл переработки Cu- или Pb-содержащего сырья, катодный продукт-2, поступающий в

цикл рафинирования свинца, и анодный продукт-2 (висмут черновой), являющийся товарной продукцией производства (см. табл. 5). Анодный продукт-2 или висмут черновой (выход – 1,1%) содержит 93,6% Bi; 4,1% Pb, извлечение, %: Bi – 19,0; Pb – 0,1. В катодный продукт-2 (выход – 5,1%), содержащий, %: Bi – 0,033; Pb – 97,8, переходит, %: ~1,2 Bi; 9,1 Pb. Солевой плав-2 (выход – 23,3%) концентрирует, %: Bi – 0,01; Pb – 5,0 при содержании, %: Bi – 0,003; Pb – 11,9. Основные технико-экономические показатели электролиза делятся на две стадии: анодный выход по току – 50%; катодный выход по току – 38%; удельный расход электроэнергии по свинцу – 3130 кВт·ч/(т Pb); удельный расход электроэнергии по висмуту – 23810 кВт·ч/т Bi [17].

Таблица 5. Вторая стадия электролиза
Table 5. The second stage of electrolysis

Компонент	Всего, г	Масса (m, г) / Содержание (β, %) / Распределение (ε, %)		
		m / β / ε		β
		Bi	Pb	Zn/Sb/As/Sn/Cu
Загружено				
Анодный продукт-1	43,9	11,7/26,7/100	32,1/73,1/36,2	0,08/–/–/0,13
Смесь солей	268,6		36/13,4/40,6	19,2/–/–/–
Pb-гранулы	20,5		20,5/100/23,2	–
ИТОГО:	333	11,7/–/100	88,6/–/100	–
Получено				
Анодный продукт-2	12,3	11,5/93,6/98,7	0,5/4,1/0,6	0,014/0,006/0,007/0,001/0,013
Катодный продукт-2	58,1	0,7/0,03/1,3	56,8/97,8/64,2	0,004/–/–/–/0,056
Солевой плав-2	262,5	0,01/0,003/0,1	31,2/11,9/35,2	20,6/0,006/0,004/0,001/0,0002
ИТОГО:	333	11,7/–/100	88,6/–/100	–

Таким образом, результатом реализации представленной технологической схемы переработки висмутистых оксидов является выделение товарного продукта – висмута черного состава, %: Bi – 93,6; Pb – 4,1 при сквозном извлечении, %: ~19,0 Bi; 0,1 Pb. Образуется ряд промежуточных продуктов, перерабатываемых в смежных производствах: шлак, пыли и возгоны восстановительной плавки висмутистых оксидов и реагентной очистки висмутистого свинца; сульфидные шликеры; щелочной плав; катодные продукты и солевые плавы первой и второй стадий электролиза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследована пирозлектрометаллургическая переработка в расплаве хлоридных солей (состав, %: NaCl – 7, KCl – 35, PbCl₂ – 18, ZnCl₂ – 40) Pb-Bi сплава, полученного после реагентной обработки исходного висмутистого свинца. Для выделения черного висмута осуществлен процесс анодной поляризации в две стадии при температуре 550°C.

2. На первой стадии электролиза (анодная плотность тока – 0,5 А/см²; катодная плотность тока – 1,4–1,5 А/см²; интегральное рабочее напряжение – 9,4–10,1 В; интегральная токовая нагрузка – 9,3–9,5 А) выделяется анодный продукт-1 (выход – 17,3–48,5% от исходного Pb-Bi сплава), содержащий, %: Bi – 16,6–48,4 и Pb – 51,4–83,2; стадийное извлечение Bi – 92,2–96,6% и Pb – 9,8–44,4%. Основные фазы сплава: Bi_{0,3}Pb_{0,7}; Bi_{0,95}Pb_{0,05}. В катодный продукт-1 первой стадии (67,5–78,7% от Pb-Bi сплава), содержащий 0,005% Bi и 97,2% Pb, переходит около 0,05% Bi и 56,2% Pb. Сплав-1 состоит из элементарных Pb и Zn. Часть висмута и свинца (Bi – 0,9% и Pb – 46,8–68,8%) концентрируется в солевом плаве-1 (выход – 253,2–300,4% от исходного сплава), содержащем, %: Bi – 0,03 и Pb – 26,8–36,6. Основные фазы плава-1: KPb₂Cl₅; K₂Pb₂O₄; KCl. Выход по току, %: анодный – 56,6–94,5; катодный – 37,6–60,9. Расход электроэнергии по свинцу – 2583–4631 кВт·ч/(т Pb), по висмуту – 25535–29645 кВт·ч/(т Bi).

3. Назначением второй стадии электролиза (анодная плотность тока – 0,4 А/см², ка-

тодная плотность тока – 1,0 А/см², интегральное рабочее напряжение – 8,0 В, интегральная токовая нагрузка – 6,8 А), проводимой в обновленном хлоридном электролите аналогичного состава, является переработка анодного продукта-1. Анодный продукт-2 второй стадии (выход – 28,1% от обогащенного Pb-Bi сплава-1) содержит, %: Bi – 93,6; Pb – 4,1; Ag – 0,086; As – 0,0066; Sb – 0,006; Cu – 0,0013; Sn – 0,001; Zn – 0,0014, стадийное извлечение, %: Bi – 98,6; Pb – 1,6. Основная фаза сплава – Bi_{0,95}Pb_{0,05}. В катодный продукт-2 (выход – 132,5% от обогащенного Pb-Bi сплава-1) состава, %: Bi – 0,033; Pb – 97,8 переходит, %: ~0,2 Bi; 111,5 Pb. Основные фазы – элементарные Pb и Zn. Солевой плав-2 (выход – 617,6 % от обогащенного Pb-Bi сплава-1) концентрирует 0,1% Bi при содержании 0,003% Bi. Основные фазы плава-2: K₂ZnCl₄; ZnCl₂; NaCl; KCl. Выход по току, %: анодный – 80,9; катодный – 94,9. Удельный расход электроэнергии по свинцу – 2557 кВт·ч/т Pb, по висмуту – 6995 кВт·ч/т Bi.

4. Для реализации технологии в опытно-промышленном масштабе рекомендованы следующие режимы пирозлектрометаллургической переработки в две стадии Pb-Bi сплава-1, полученного после реагентной обработки висмутистого свинца:

- температура процесса составила 550–600°C;

- анодная плотность тока, А/см², на первой/второй стадии – 0,5/(0,2–0,3);

- катодная плотность тока на первой/второй стадии – 1,5/1,0;

- рабочее напряжение на ванне, В, на первой/второй стадии – (8–12)/(5–8);

- состав электролита на обеих стадиях, %: NaCl – 7, KCl – 35, PbCl₂ – 18, ZnCl₂ – 40;

- количество электролита, выводимого на переработку: на первой стадии – 10% от массы Pb-Bi сплава после щелочной обработки; на второй стадии – 10% от массы анодного продукта первой стадии.

При осуществлении электролиза Pb-Bi сплава в одну стадию следует принимать режимы второй стадии процесса.

5. Выделенный в ходе восстановительной плавки оксидов висмутистый свинец (выход – 70,0% от оксидов) содержит, % масс.: Bi –

7,3; Pb – 76,7. Извлечение металлов в сплав, %: Bi – 96,0; Pb – 97,2. Шлак (выход – 83,0% от оксидов) состава, %: Bi – 0,18; Pb – 1,3; SiO₂ – 24,0; Na₂O – 55,6; MgO – 7,7; CaO – 6,9; FeO – 0,5. В него переходит, %: Bi – 2,8; Pb – 2,0.

6. Реагентная обработка висмутистого свинца позволяет в количестве 37,2% от оксидов выделить обезмеженный сплав (%: Bi – 7,7; Pb – 87,9), аккумулирующий 54,0% Bi; 59,3% Pb. В сульфидные шликеры (выход – 32,4% от оксидов) извлекается 33,3% Bi и 37,1% Pb при содержании 5,5% Bi и 63,2% Pb. Сплав после щелочной обработки имеет следующие параметры: выход – 12,5% от оксидов; состав, %: Bi – 8,7, Pb – 91,0; извлечение из оксидов – 20,4% Bi и 20,6% Pb. В щелочной плав (выход – 29,0% от оксидов) переходит из оксидов 19,5% Bi и 30,1% Pb; содержания металлов составляют, %: 3,6 Bi и 57,3 Pb.

7. На первой стадии электролиза получен анодный продукт-1 (выход – 3,9% от оксидов), содержащий, %: 26,7 Bi и 73,1 Pb; извлечение металлов из оксидов, %: 19,3 Bi и 5,1 Pb. В катодный продукт-1 первой стадии

электролиза (выход – 9,2% от оксидов), содержащий 0,005% Bi и 97,2% Pb, из оксидов переходит 0,01% Bi и 16,3% Pb. Часть висмута и свинца (1,2 и 6,6%, соответственно) концентрируется в солевом плаве-1, выделяемом на первой стадии электролиза (выход – 32,4% от оксидов), содержащем, %: 0,19 Bi и 11,2 Pb. Анодный продукт-2 второй стадии электролиза – черновой висмут (выход – 1,1% от оксидов) содержит 93,6% Bi и 4,1% Pb, извлечение из оксидов – 19,0% Bi и 0,1% Pb. В катодный продукт-2 второй стадии электролиза (выход – 5,1% от оксидов), содержащий 0,033% Bi и 97,8% Pb, переходит около 1,2% Bi и 9,1% Pb от содержащихся в оксидах. Солевой плав-2, выделяемый на второй стадии электролиза (выход – 23,3% от оксидов), концентрирует 0,01% Bi и 5,0% Pb оксидов при содержаниях, %: 0,003 Bi и 11,9 Pb. Основные технико-экономические показатели электролиза проходят две стадии: анодный выход по току – 50%; катодный выход по току – 38%; удельный расход электроэнергии по свинцу – 3130 кВт·ч/(т Pb); удельный расход электроэнергии по висмуту – 23810 кВт·ч/(т Bi).

Список источников

1. Юхин Ю. М., Михайлов Ю. И. Химия висмутовых соединений и материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 360 с.
2. Jung In-Ho, Kang Dae Hoon, Park Woo-Jin, Kim Nack, Ann Sang Ho. Applications of thermodynamic calculations to Mg alloy design: Mg-Sn based alloy development // International Journal of Materials Research. 2007. Vol. 98. Iss. 9. P. 807–815. <https://doi.org/10.3139/146.101542>.
3. Смирнов М. П. Рафинирование свинца и переработка полупродуктов. М.: Изд-во «Металлургия», 1977. 280 с.
4. Поливянный И. Р., Абланов А. Д., Батырбекова С. А. Висмут. Алма-Ата: Изд-во «Наука», 1989. 316 с.
5. Королев А. А., Сергейченко С. В., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С. Переработка висмутистых оксидов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23. № 3. С. 155–165. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2021-23.3-155-165>.
6. Lu Dian-kun, Jin Zhe-nan, Chang Yong-feng, Sun Shu-chen. Mechanism of debismuthizing with calcium and magnesium // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013. Vol. 23. Iss. 5. P. 1501–1505. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62622-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62622-9).
7. Castle J. F., Richards J. H. Lead refining: Current technology and a new continuous process // Advances in Extractive Metallurgy: An international symposium organized by the Institution of Mining and Metallurgy (London, 18–20 April 1977). London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1977. P. 217–234.
8. Hibbins S. G., Closset B., Bray M. Advances in the refining and alloying of low-bismuth lead // Journal of Power Sources. 1995. Vol. 53. Iss. 1. P. 75–83. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(94\)02007-P](https://doi.org/10.1016/0378-7753(94)02007-P).
9. Betterton J. O., Lebedeff Y. Debismuthing lead with alkaline earth metals // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Incorporated. 1936. Vol. 121. P. 205–225.
10. Evers D. Debismuthing by the Kroll–Betterton process // Metallhutenw. 1949. Vol. 2. P. 129–133.
11. Davey T. R. A. Debismuthing of lead // Journal of Metals. 1956. Vol. 3. P. 341–350.
12. Iley J. D., Ward D. H. Development of a continuous process for the fine debismuthizing of lead // Advances in Extractive Metallurgy: An international symposium orga-

nized by the Institution of Mining and Metallurgy (London, 18–20 April 1977). London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1977. P. 133–139.

13. Hancock P., Harris R. Solubility of calcium–magnesium–bismuth intermetallic in molten lead // *Canadian Metallurgy Quarterly*. 1991. Vol. 30. Iss. 4. P. 275–276. <https://doi.org/10.1179/CMQ.1991.30.4.275>.

14. Lu Dian-kun, Jin Zhe-nan, Chang Yong-feng, Sun Shu-chen. Mechanism of debismuthizing with calcium and magnesium // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013. Vol. 23. Iss. 5. P. 1501–1505. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62622-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62622-9).

15. Lu Dian-kun, Liu Xue-shan, Ye Guo-rui, He Jia-qi. Thermodynamical analysis of debismuthizing mechanism with calcium and magnesium // *Journal of Shenyang Institute of Gold Technology*. 1997. Vol. 16. Iss. 2. P. 110–115.

16. Lu Dian-kun, Jin Zhe-nan, Jiang Kai-xi. Fine debismuthizing with calcium, magnesium and antimony // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011. Vol. 21. Iss. 10. P. 2311–2316. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61013-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61013-3).

17. Zhang J. A review of steel corrosion by liquid lead and lead–bismuth // *Corrosion Science*. 2009. Vol. 51. Iss. 6. P. 1207–1227. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.013>.

18. Paliwal M., Jung In-Ho. Thermodynamic modeling of the Mg–Bi and Mg–Sb binary systems and short-range-ordering behavior of the liquid solutions // *Calphad*. 2009. Vol. 33. Iss. 4. P. 744–754. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2009.10.002>.

19. Notin M., Mejbär J., Bouhaijb A., Charles J., Hertz J. The thermodynamic properties of calcium intermetallic compounds // *Journal of Alloys and Compounds*. 1995. Vol. 220. P. 62–75.

20. Fan Jinlong, Wang Gang, Li Qing, Yang Haowei, Xu Shuo, Zhang Jie, et al. Extraction of tellurium and high purity bismuth from processing residue of zinc anode slime by sulfation roasting-leaching-electrodeposition process // *Hydrometallurgy*. 2020. Vol. 194. P. 105348. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105348>.

21. Пат. № 2046832, Российская Федерация, C22B 13/00, C22B 7/00, C22B 13/02. Способ гидрометаллургической переработки щелочного сульфидно-сульфатного плава от плавки свинцового концентрата / Н. В. Ходов, М. П. Смирнов, О. К. Кузнецов, К. М. Смирнов; заявитель и патентообладатель Ходов Н. В. Заявл. 14.09.1992; опубл. 27.10.1995.

22. Пат. № 1192411, Российская Федерация, C25C 3/34. Способ переработки сплавов, содержащих свинец и висмут / О. Г. Зарубицкий, С. Н. Сутурин, А. А. Омельчук, В. Т. Мелехин, Ю. С. Корюков, В. Е. Дьяков [и др.]; заявитель и патентообладатель Институт общей и неорганической химии АН УССР. Заявл. 26.09.1983; опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.

23. Пат. № 106048224, Китайская Народная Республика, C22B 5/02, C22B 30/06. Способ ведения низкотемпературной восстановительной плавки висмутсодержащих соединений / Liu Weifeng, Fu Xinxin, Deng Xunbo, et al.; заявитель Central South University; Заявл. 30.06.2016; опубл. 26.10.2016.

References

1. Yukhin Yu. M., Mikhailov Yu. I. *Chemistry of bismuth compounds and materials*. Novosibirsk: Institute of solid state chemistry and mechanochemistry of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences; 2001, 360 p. (In Russ.).

2. Jung In-Ho, Kang Dae Hoon, Park Woo-Jin, Kim Nack, Ann Sang Ho. Applications of thermodynamic calculations to Mg alloy design: Mg–Sn based alloy development. *International Journal of Materials Research*. 2007;98(9):807–815. <https://doi.org/10.3139/146.101542>.

3. Smirnov M. P. *Lead refining and processing of intermediates*. Moscow: Metallurgy; 1977, 280 p. (In Russ.).

4. Polyvyanny I. R., Ablanov A. D., Batyrbekova S. A. *Bismuth*. Alma-Ata: Nauka; 1989, 316 p. (In Russ.).

5. Korolev A. A., Sergeichenko S. V., Timofeev K. L., Maltsev G. I., Voinkov R. S. Recycling of bismuth oxides. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*. 2021;23(3):155–165. [https://doi.org/10.17212/1994-6309-](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2021-23.3-155-165)

2021-23.3-155-165. (In Russ.).

6. Lu Dian-kun, Jin Zhe-nan, Chang Yong-feng, Sun Shu-chen. Mechanism of debismuthizing with calcium and magnesium. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013;23(5):1501–1505. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62622-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62622-9).

7. Castle J. F., Richards J. H. Lead refining: current technology and a new continuous process. In: *Advances in Extractive Metallurgy: An international symposium organized by the Institution of Mining and Metallurgy*. 18–20 April 1977, London. London: The Institution of Mining and Metallurgy; 1977, p. 217–234.

8. Hibbins S. G., Closset B., Bray M. Advances in the refining and alloying of low-bismuth lead. *Journal of Power Sources*. 1995;53(1):75–83. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(94\)02007-P](https://doi.org/10.1016/0378-7753(94)02007-P).

9. Betterton J. O., Lebedeff Y. Debismuthing lead with alkaline earth metals. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*

Incorporated. 1936;121:205-225.

10. Evers D. Debismuthing by the Kroll-Betterton process. *Metallhutenw*. 1949;2:129-133.

11. Davey T. R. A. Debismuthing of lead. *Journal of Metals*. 1956;3:341-350.

12. Iley J. D., Ward D. H. Development of a continuous process for the fine debismuthizing of lead. In: *Advances in Extractive Metallurgy: An international symposium organized by the Institution of Mining and Metallurgy*. 18–20 April 1977, London. London: The Institution of Mining and Metallurgy; 1977, p. 133-139.

13. Hancock P., Harris R. Solubility of calcium–magnesium–bismuth intermetallic in molten lead. *Canadian Metallurgy Quarterly*. 1991;30(4):275-276. <https://doi.org/10.1179/CMQ.1991.30.4.275>.

14. Lu Dian-kun, Jin Zhe-nan, Chang Yong-feng, Sun Shu-chen. Mechanism of debismuthizing with calcium and magnesium. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013;23(5):1501-1505. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62622-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62622-9).

15. Lu Dian-kun, Liu Xue-shan, Ye Guo-rui, He Jia-qi. Thermodynamical analysis of debismuthizing mechanism with calcium and magnesium. *Journal of Shenyang Institute of Gold Technology*. 1997;16(2):110-115.

16. Lu Dian-kun, Jin Zhe-nan, Jiang Kai-xi. Fine debismuthizing with calcium, magnesium and antimony. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(10):2311-2316. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61013-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61013-3).

17. Zhang J. A review of steel corrosion by liquid lead and lead–bismuth. *Corrosion Science*. 2009;51(6):1207-1227. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.013>.

18. Paliwal M., Jung In-Ho. Thermodynamic modeling of the Mg–Bi and Mg–Sb binary systems and short-range-ordering behavior of the liquid solutions. *Calphad*. 2009;33(4):744-754.

<https://doi.org/10.1016/j.calphad.2009.10.002>.

19. Notin M., Mejbar J., Bouhajib A., Charles J., Hertz J. The thermodynamic properties of calcium intermetallic compounds. *Journal of Alloys and Compounds*. 1995;220:62-75.

20. Fan Jinlong, Wang Gang, Li Qing, Yang Haowei, Xu Shuo, Zhang Jie, et al. Extraction of tellurium and high purity bismuth from processing residue of zinc anode slime by sulfation roasting-leaching-electrodeposition process. *Hydrometallurgy*. 2020;194:105348. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105348>.

21. Khodov N. V., Smirnov M. P., Kuznetsov O. K., Smirnov K. M. *Hydrometallurgical processing method of alkaline sulfide-sulfate melt from melting of lead concentrate*. Patent RF, no. 2046832; 1992. (In Russ.).

22. Zarubitsky O. G., Sutorin S. N., Omelchuk A. A., Mel'ekhin V. T., Kryukov Yu. S., Dyakov V. E., et al. *Processing method for lead- and bismuth-containing alloys*. Patent RF, no. 1192411; 1983. (In Russ.).

23. Weifeng L., Xinxin F., Xunbo D., et al. *Method of conducting low-temperature reduction melting of bismuth-containing compounds*. Patent CN, no. 106048224; 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Королев Алексей Анатольевич,

кандидат технических наук,
главный инженер,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Сергейченко Сергей Вячеславович,

заведующий лабораторией,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Тимофеев Константин Леонидович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии,
Технический университет Уральской
горно-металлургической компании;
начальник технического отдела
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. Korolev,

Cand. Sci. (Eng.),
Chief Engineer,
JSC Uralelectromed,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia

Sergey V. Sergeichenko,

Head of the Laboratory,
JSC Uralelectromed Research Center,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia

Konstantin L. Timofeev,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Metallurgy,
Technical University of the Ural Mining and Metallurgical
Company;
Head of the Technical Department
of JSC Uralelectromed,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia

Мальцев Геннадий Иванович,

доктор технических наук, старший научный
сотрудник,
главный специалист,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Gennady I. Maltsev,

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Chief Specialist,
JSC Uralelectromed Research Center,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia

Воинков Роман Сергеевич,

кандидат технических наук,
начальник исследовательского центра,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Roman S. Voinkov,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Research Center,
Uralelectromed JSC Research Center,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 29.12.2021.

Information about the article

The article was submitted 22.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 29.12.2021.

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: **pgr@istu.edu в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Кибер-Ленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.
Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.
Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: **pgr@istu.edu**

ISSN 2782-4004 (print)

iPolytech Journal

Том 25, № 6. 2021 / Vol. 25, № 6. 2021

16+



Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 31.12.2021 г.
Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 16.
Тираж 500 экз. Заказ 207. 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, 83А