

Том 25 № 3
2021

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

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+



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

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2021

Том 25 № 3

2021

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 25 № 3

2021

Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Редакционная коллегия

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 машиноведение" (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., декан факультета переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

БЛОМЕНШТЕЙН 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)

ГВЛИК 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)

МЫМИН 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)

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

ШОЛЬТЕС Бертольд, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

Издательство Иркутского
национального исследовательского
технического университета

Журнал основан в 1997 г.
Периодичность издания –
6 раз в год

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор).

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

Учредитель Иркутский национальный
исследовательский технический
университет

Подписной индекс в каталоге
Агентства 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: ppg@istu.edu

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta

Vol. 25 No. 3

2021

Publishers of Irkutsk National
Research Technical University

Editorial board

Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, 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)

Vasiliy 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)

Vasiliy 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)

Elena 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)

The Journal was founded in 1997
Frequency of publication – 6 times a year
The journal is registered with the Federal
Agency for Supervision of Communications,
Information Technologies and Mass Media
(Roskomnadzor).

Certificate of registration

№ ПИ № ФС77-62813

of 18 August, 2015.

Founder: Irkutsk National Research
Technical University

Subscription index in the catalog
of JSC «Economic Newspaper»
Publishing House

“The united catalog. Russian press.
Newspapers and journals”-
41476 (OK + EC)

Address of JSC

«Economic Newspaper»:
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

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	286
------------------	-----

Машиностроение и машиноведение

Дударев А.С., Гумаров Э.Х. Исследование теплофизики при алмазном сверлении стеклопластиков и углепластиков.....	290
Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Ракицкая В.Б. Повышение эффективности зачистки поверхностей двойной кривизны на установке с револьверной головкой.....	300
Литвинов А.Е., Поляков П.А., Голиков А.А., Задеянчук Н.А. Разработка метода рационального проектирования фрикционного узла тормоза дисково-колодочного типа.....	309
Савицкий И.В., Войтенко В.А. Исследование метода шлифования сапфировых труб с применением двух шлифовальных инструментов.....	320
Фокин И.В., Смирнов А.Н. Разработка математической модели маршрута изготовления изделий машиностроения.....	332

Энергетика

Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р., Савина М.В. Добавление водорода к топливному газу для повышения энергетических характеристик газотурбинных установок.....	342
Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России.....	356
Шойко В.П., Духанина К.В. Оценка эффективности применения фазопоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередачи с учетом режима прилегающей сети.....	369

Металлургия и материаловедение

Фещенко Р.Ю., Ерохина О.О., Еремин Р.Н., Матыльский Б.Э. Анализ методов повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, используемых в металлургических и химических агрегатах.....	380
Чернигов Д.А., Богородский А.В., Набиулин Р.Н., Минеева Т.С. Исследование процессов сгущения продуктов обогащения золотосодержащих руд..	391

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta

Vol. 25 No. 3

2021

CONTENTS

Contents.....	287
---------------	-----

Mechanical Engineering and Machine Science

 Dudarev A.S., Gumarov E.Kh. Research of thermal physics in diamond drilling of fiberglass and carbon fiber.....	290
 Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Rakitskaya V.B. Improving stripping efficiency of double curvature surface on a setup with turret head.....	300
 Litvinov A.E., Polyakov P.A., Golikov A.A., Zadayanchuk N.A. Rational design for a friction unit of a disc-shoe brake.....	309
 Savitskiy I.V., Voitenko V.A. Studying a grinding method of sapphire pipes using two grinders.....	320
 Fokin I.V., Smirnov A.N. A mathematical model for production routing of mechanical engineering products.....	332

Power Engineering

 Marin G.E., Osipov B.M., Akhmetshin A.R., Savina M.V. Adding hydrogen to fuel gas to improve energy performance of gas-turbine plants.....	342
 Panteleev V.I., Kuzmin I.S., Zavalov A.A., Tikhonov A.V., Umetskaya E.V. Power quality in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia.....	356
 Shoiko V.P., Dukhanina K.V. Use of a phase-shifting transformer for increasing the power transmission capacity, taking into account the mode of the adjacent network.....	369

Metallurgy and Materials Science

 Feshchenko R.Yu., Erokhina O.O., Eremin R.N., Matylskiy B.E. Analysis of methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products used in metallurgical and chemical units.....	380
 Chernigov D.A., Bogorodskiy A.V., Nabiulin R.N., Mineeva T.S. Research into thickening processes of concentrates of gold-bearing ores.....	391



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Уважаемые читатели!

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

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

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

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University
Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Dear Readers!

We would like to bring to your attention the next issue of the scientific journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University". The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published.

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

The journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University" is abstracted and reviewed.

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

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

Editorial Board



Study of thermophysics during diamond drilling of fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites

Aleksandr S. Dudarev, Eldar Kh. Gumarov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract: This paper examines thermophysics of the drilling process of polymeric composite materials, such as carbon-fibre-reinforced plastics (CFRP) and fibreglass by tubular diamond drill bits. Features of the COMSOL Multiphysics engineering software package were used. We employed Fourier heat equations, which express the intensity of heat gain by a mobile source in a moving coordinate system. The research was performed using the proprietary method of modelling spatial thermal action upon drilling polymer composite materials (fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastics) in the COMSOL Multiphysics software environment. A tubular diamond drill bit with a diameter of 10 mm with two slots was chosen as a model cutting tool. Solid plates with a thickness of 5.5 mm made of layered fibrous polymer composite materials (fibreglass, carbon-fibre-reinforced plastic) were used as a preform. As a result of computer calculations, we obtained temperature fields of fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastic during diamond drilling with a tubular tool. When studying the thermal behaviour of fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastics, maximum temperature fields were located. The study revealed that the temperature reaches 413.6 and 448.7 K during CFRP and fibreglass drilling, respectively. It was shown that the distance of heat transfer from the edge of the hole into the preform was 6.42 and 6.40 mm for CFRP and fibreglass, respectively. A method of modelling the thermal effects when cutting polymer composite materials developed in the COMSOL Multiphysics environment allows complex analytical calculations of temperatures induced by drilling to be simplified. In addition, its use prevents overheating of a preform during drilling, allows assessing the depth of heat distribution inside the preform from the edge of the formed hole in different polymer composite materials. These measures increase the machining quality of polymer composite materials.

Keywords: thermal physics, drilling, cutting, polymer composite materials, temperature, heat capacity

For citation: Dudarev AS, Gumarov EK. Research of thermal physics in diamond drilling of fiberglass and carbon fiber. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):290–299. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-290-299>

УДК 621.95.01

Исследование теплофизики при алмазном сверлении стеклопластиков и углепластиков

© А.С. Дударев, Э.Х. Гумаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Резюме: Цель – исследование теплофизики процесса сверления трубчатыми алмазными сверлами полимерных композиционных материалов типа углепластиков, стеклопластиков на основании возможностей инженерного пакета Comsol Multiphysics. В работе использованы уравнения теплопроводности Фурье, выражающие интенсивность притока теплоты движущимся источником в подвижных координатах. Исследования проводились с применением авторской методики моделирования пространственного термического воздействия при сверлении полимерных композиционных материалов (стеклопластиков и углепластиков) в среде Comsol Multiphysics. В качестве модели режущего инструмента была выбрана конструкция алмазного сверла трубчатого типа диаметром 10 мм с двумя прорезями. В качестве модели заготовки были спроектированы твердотельные модели пластин толщиной 5,5 мм из слоистых волокнистых полимерных композиционных материалов: стеклопластика, углепластика. В результате компьютерного расчета были получены температурные поля стеклопластика и углепластика при сверлении алмазным трубчатым инструментом. При изучении термического воздействия стеклопластиков и углепластиков установлены дислокации максимальных температурных полей. В проведенном исследовании было выявлено, что температура при сверлении углепластика достигает 413,6 К, а температура при сверлении стеклопластика – 448,7 К. Показано, что расстояние, на которое распространяется тепло от краев отверстия внутрь заготовки, у углепластика составляет 6,42 мм, а у стеклопластика – 6,40 мм. Разработанная методика моделирования термического воздействия резания полимерных композиционных материалов в среде COMSOL Multiphysics

позволяет значительно упростить сложные аналитические расчеты возникающих при сверлении температур, помогает избежать перегрева заготовки при сверлении, позволяет оценить глубины распространения теплоты внутрь заготовки от края образованного отверстия различных типов полимерных композиционных материалов, что повышает качество механической обработки деталей из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: теплофизика, сверление, резание, полимерные композиционные материалы, температура, теплоемкость

Для цитирования: Дударев А.С., Гумаров Э.Х. Исследование теплофизики при алмазном сверлении стеклопластиков и углепластиков. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 290–299. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-290-299>

INTRODUCTION

Polymeric composites are multi-component materials comprising a plastic matrix and a filler – reinforcing fibres with a high strength, stiffness and other properties. Combining different source components yields an advanced composite material with new properties uncharacteristic of its original constituents. One can obtain a wide range of polymer composite materials with the required properties by varying the composition of the matrix and filler, their ratio, the orientation of reinforcing fibres. Many polymer composite materials (PCM) surpass conventional engineering materials and alloys not only in their mechanical properties, but also lightness. Using polymer composite materials allows the weight of the constructions to be reduced while maintaining or improving their mechanical characteristics.

According to Melentyev et al., machining, in particular, PCM drilling, has a number of specific characteristics, determined by particularities of their structure, mechanical and thermophysical properties [1–4]. Nevertheless, PCM machining is accompanied by the same phenomena as that of metals, i.e., chip formation, power and thermal effects, intensive wear of the cutting tool. Each of these phenomena has its own specifics when cutting metals; therefore, it is necessary to evaluate the thermophysical effects of PCM cutting to control the entire process [4, 5].

AIM

Mechanical processing of PCM has been poorly studied for several reasons¹ [6]. Thermal

effects play an important role in the machining process.

PCMs have a pronounced anisotropy of not only physical-mechanical but also thermophysical properties, which complicates the problem.

The aim of this study was to determine temperatures in the cutting zone of polymer composite materials, i.e. fiberglass and carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP), drilled with a diamond tool, as well as to establish the depth of heat distribution from the edge of the hole inside various PCM samples.

Thermophysical analysis conducted to manage thermal processes during operation is a possible approach to product quality improvement [7].

The temperature in the cutting zone can be determined experimentally or calculated. Two numerical methods are used to calculate temperature fields in the cutting zone: finite element method and finite difference method [8].

The thermal solution during cutting is considered time-consuming [9–16]. For the fibrous polymer composite parts, the complexity increases manifold [17, 18]. Engineering packages such as computer-aided engineering (CAE) ANSYS, Abaqus, COMSOL Multiphysics and other computer-aided design systems have been developed to facilitate thermal and other related problems.

The above-mentioned CAEs interpret the process of solving engineering and scientific problems using numerical methods. Add-in modules contain specialised tools for modelling the processes and effects in electrodynamics

¹Dudarev AS. Increasing the efficiency and quality of machining the holes based on stabilising the drilling of the polymer composite materials: thesis ... PhD Tech.: 05.02.08. Perm, 2009. 170 p. / Дударев А.С. Повышение эффективности и качества обработки отверстий на основе стабилизации процесса сверления изделий из полимерных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Пермь, 2009. 170 с.



and optics, mechanics and acoustics, hydrodynamics and heat transfer, chemistry and electrochemistry, etc.

A numerical simulation of drilling was performed in the COMSOL Multiphysics engineering package.

Numerical simulation of cutting during machining gives the following advantages in comparison with analytical and experimental research methods [19]:

- timely, three-dimensional representation of power characteristics and heat transfer processes;
- consideration of the effect of temperature and its propagation rate on the physical and mechanical properties of materials when modelling the moulding process;
- relatively low-budget research.

RESEARCH METHOD

The COMSOL Multiphysics environment was used to simulate thermal effects when drilling polymer composite materials.

A tubular diamond drill bit with a diameter of 10 mm with two slots was chosen as a model cutting tool (fig. 1). The structure was subjected to preliminary industrial tests [20].



Fig. 1. Example of tubular drill bit (diameter of 10 mm)
Рис. 1. Общий вид трубчатого сверла (диаметр 10 мм)

Constructing the geometry is one of the first steps in developing a machining process. The COMSOL package offers various geometric operations, tools and functions to render geometry, including inbuilt geometry primitives, as well as logical, splitting and other CAD operations.

Our study included surface modelling of a cutting tool and polymer composite preforms

(fibreglass and CFRP). Then the interconnection was established, and the calculation began.

A three-dimensional model of the tubular diamond drill bit with a diameter 10 of mm is shown in fig. 2.

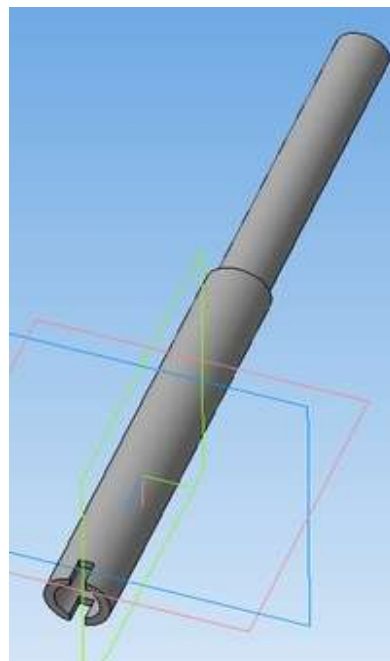


Fig. 2. Three-dimensional model of a tubular drill bit (diameter of 10 mm)
Рис. 2. Трехмерная модель трубчатого сверла (диаметр 10 мм)

When creating a preform model in the form of a PCM plate (polymer binding matrix and reinforcing fibres), a Rectangle command was used. Cross-section of PCMs comprises a laminated structure of fibres and a matrix; therefore using simple cylinders and rectangles in the cross-section model is reliable. Using simple figures, we built a layered plate structure with a total height of 5.5 mm and set cohesion bonds between the layers. The plates comprised reinforcing glass fibres with a binder and carbon fibres with the binder. The thickness of the binder was 50 μm , the thickness and diameter of fibres were 150 μm .

A processing model was created first in the form of a 2D rough drawing in 2D Axisymmetric (fig. 3). Further, the obtained rough drawing was turned through 360°, thus creating a 3D surface of a slot.

The Point command was utilised to separate the block scope of the figure through the bound-

aries. A separate boundary was formed for further application of the thermal effects.

To simulate the heat effect, the Heat Transfer submenu was selected in the physics section. The Heat Transfer interface and thermal multi-physical links were used to simulate heat transfer by thermal conductivity, convection and conjugated heat transfer.

Heat Transfer in Solids function is based on the Fourier Law. The stationary mode was selected. For heat transfer, the stationary mode is used to calculate the temperature field at thermal equilibrium.

The inbuilt COMSOL library allows material with the characteristics and properties of a polymer composite to be used. Each material is characterised by properties and defined functions. The library provides 24 main temperature-dependent characteristics. In the COMSOL software complex, material properties can be presented in a graph, and new components can be added to the library.

For models of the contact problem arising from the interaction of a diamond-tube tool with various polymer composite preforms, it is necessary to choose fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastic.

As known [21], polymer composite materials comprise the layers of filler (fibreglass, carbon fibre) and binder (epoxy resin matrices). Therefore, we build the layers, set the properties (table) layer by layer and the cohesion bonds between them.

In addition, thermophysical properties of polymeric composite materials (glass and carbon fibres, binder) were assigned average values (table).

Heat-balance calculations for diamond drilling of polymer composite materials were performed using the thermal conductivity equation for deformed bodies. This heat equation - the energy equation - is derived from the law of thermodynamics [22].

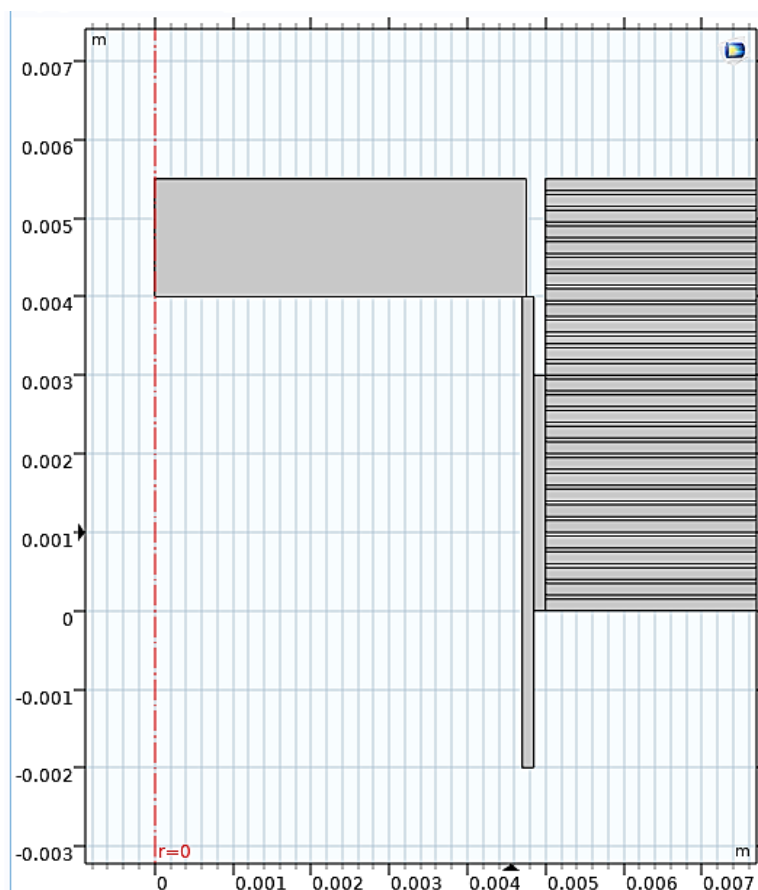


Fig. 3. Longitudinal section of a half drill bit and a polymer composite preform

Рис. 3. Продольное сечение половины сверла и заготовки из полимерных композиционных материалов



Thermophysical properties of polymer composite materials
Теплофизические свойства полимерных композиционных материалов

Material	Heat capacity C_p , J / (kg K)	Density ρ , kg / m ³	Thermal conduction coefficient λ , W / (m K)
Binder (epoxy resin)	1110	1200	0,5
Glass fibre	1700	2580	40
Carbon fibre	1100	1200	100

The COMSOL Multiphysics heat equation is as follows:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q, \quad (1)$$

where ρ is the density, kg/m³; C_p is the specific heat, J/(kg·°C); $\mathbf{u}$ is the velocity vector, m/s; ∇T is the temperature gradient, °C/m; $\mathbf{q}$ is the heat flow vector, W/m²; Q is the power of heat source per unit volume, W/m³.

For solid bodies, heat equation (1) has a slightly different form in the COMSOL Multiphysics program window:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla q = Q + Q_{ted}, \quad (2)$$

where Q_{ted} is the correction for change from an external thermal source, W/m³.

The velocity vector can be rewritten in the following form:

$$\mathbf{u} = u_x \mathbf{i} + u_y \mathbf{j} + u_z \mathbf{k}, \quad (3)$$

where u_x, u_y, u_z is the component of the motion speed of the point in a thermally conductive medium, m/s; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ are the unit vectors in the Cartesian coordinate system.

A temperature gradient ∇T is a vector directed normally to the isothermal surface towards the temperature increase and numerically equal to temperature change per unit length.

$$\nabla T = \mathbf{n} \frac{\partial T}{\partial n},$$

where $\mathbf{n}$ is the unit vector; n is a normal; ∇ is the Hamiltonian (Nabla), a symbolic vector that replaces a gradient symbol.

Based on (2), ∇T can be expressed as follows:

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x}.$$

In case heat is distributed along three axes:

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z}.$$

A vector of heat flow rate: $\mathbf{q} = -\lambda \nabla T$, where λ is the thermal conduction coefficient, W/m·°C.

Analysis of the thermal field during diamond drilling is based on solving the Fourier three-dimensional differential heat equation using common descriptions of heat flows from instantaneous point heat source.

To calculate heat fields, we selected heat-load lines applied to the polymer composite preforms from a cutting grit of the tool and set heat flow values: $q = 40 \cdot 10^6$ W/m². The heat flow value was taken from the following work [2]. The other used constants are shown in the table; the following additional literature sources were used. [23–25].

RESULTS

A solution to the discussed complex practical problem was derived based on solving the Fourier heat equation (2) for a three-dimensional case.

As a result of calculating the drilling process, performed on carbon-fibre-reinforced plastic, the temperature fields in the hole were obtained (fig. 4). The temperature distribution plot in the material from the edge of the hole is demonstrated in fig. 5.

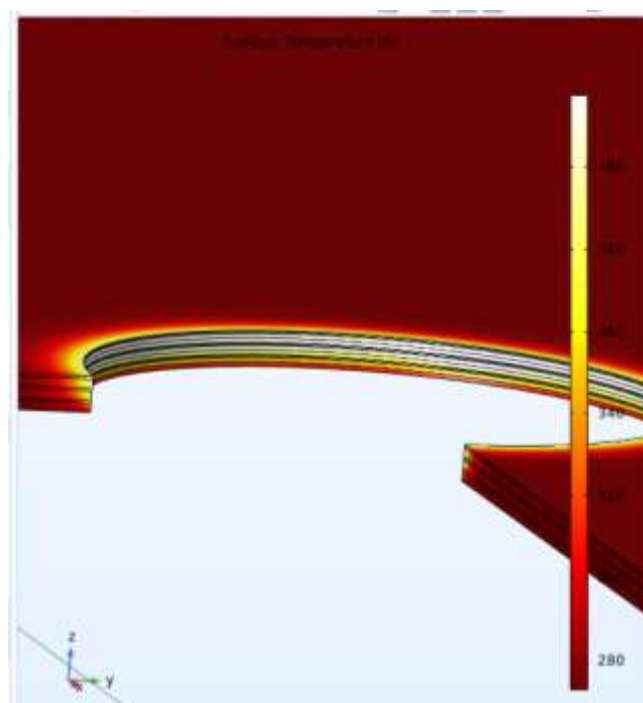


Fig. 4. Results of thermal field distribution in the cross-section of the hole in carbon-fibre-reinforced plastic
 Рис. 4. Результаты распределения тепловых полей в сечении отверстия углепластика

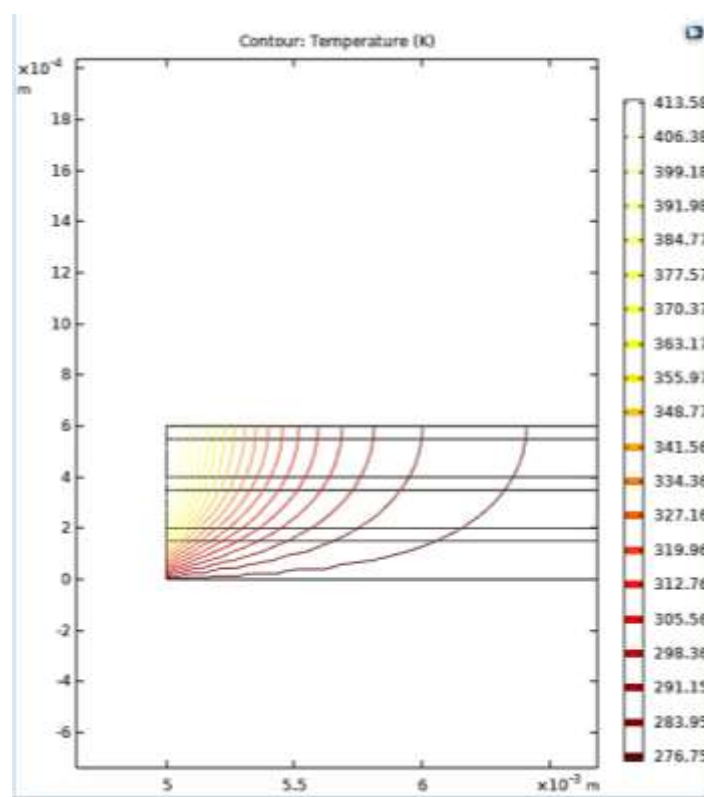


Fig. 5. Temperature as a function of hole boundary in carbon-fibre-reinforced plastic
 Рис. 5. Зависимость температуры от границы отверстия в углепластике

As a result of calculating the drilling process, performed on fibreglass, the temperature fields in the hole were obtained (fig. 6). The tempera-

ture distribution plot in the material from the edge of the hole is demonstrated in fig. 7.

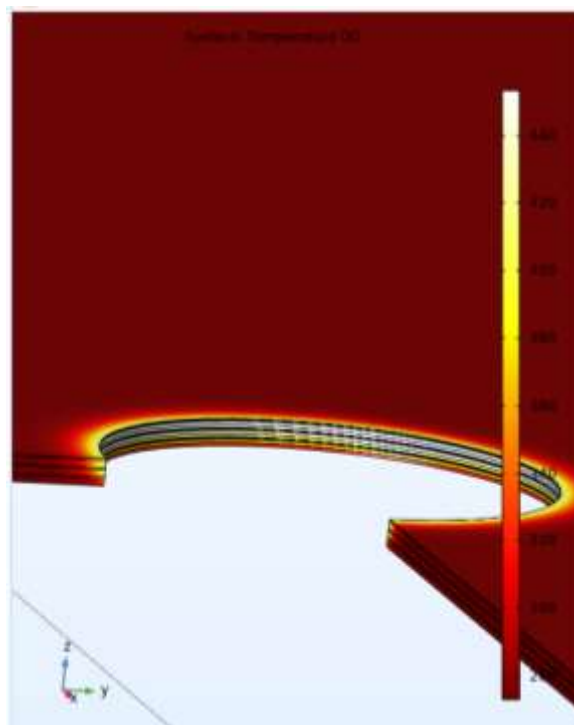


Fig. 6. Results of thermal field distribution in a cross-section of a hole in fibreglass
Рис. 6. Результаты распределения тепловых полей в сечении отверстия стеклопластика

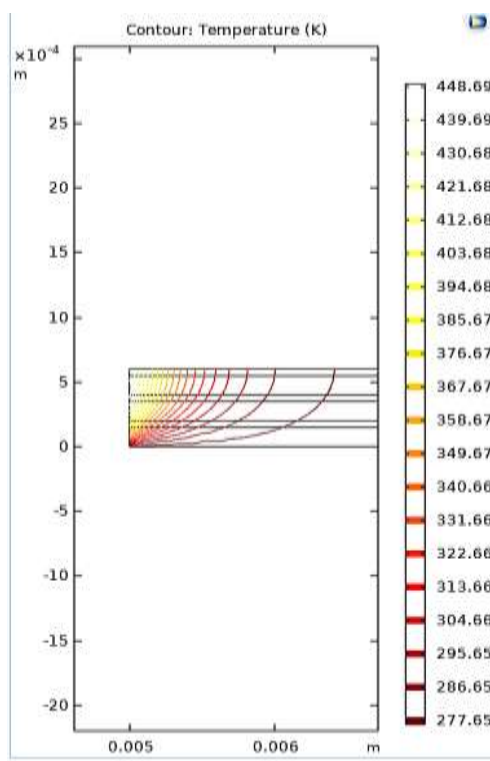


Fig. 7. Temperature as a function of hole boundary in fibreglass
Рис. 7. Зависимость температуры от границы отверстия в стеклопластике

When comparing fig. 5 and fig.7, one can notice a slightly deeper heat distribution in the fibreglass preform in fig. 7 and a higher tempera-

ture than that in the CFRP when the tubular drill bit is used.

CONCLUSIONS

As a result of computer calculations, we obtained temperature fields for fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastic. The temperature field of fibreglass has a higher distribution through the preform volume owing to the higher thermal conduction coefficient of fibreglass (100 W/(m·K)) than that of carbon-fibre-reinforced plastic (40 W/(m·K)).

The temperature of the carbon-fibre-reinforced composite and fibreglass reaches 413.6 and 448.7 K, respectively. The distance of

the heat distribution from the hole boundary for carbon-fibre-reinforced composite and fibreglass was 6.42 and 6.40 mm, respectively. Therefore, the difference in the depth of heat distribution for the described materials is insignificant.

The developed method of simulating the thermal effect of cutting polymer compound materials in the COMSOL Multiphysics environment allows possible overheating to be assessed. The overheating of the preform during processing can be avoided, resulting in higher processing quality.

References

1. Melentev RYu. Computer modeling of the thermal field in the elementary volume of polymer composites. *Problemy mashinostroeniya = Journal of Mechanical Engineering*. 2014;17(2):3–8. (In Russ.)
2. Dudarev AS, Svirshchev VI. Evaluation of the temperature field at diamond drilling of polymer composite materials. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Tula State University*. 2016;3:188–194. (In Russ.)
3. Ismail SO, Dhakal HN, Dimla E, Beaugrand J, Popov I. Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016;133:42879. <https://doi.org/10.1002/app.42879>
4. Sadek A, Shi B, Meshreki M, Duquesne J, Attia MH. Prediction and control of drilling-induced damage in fiber-reinforced polymers using a new hybrid force and temperature modelling approach. *CIRP Annals*. 2015;64(1):89–92. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.074>
5. Kuklin IA, Dudarev AS, Podvincev AV. On temperature field calculation at cutting. In: *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovacii: sbornik nauchnykh trudov XX Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Aerospace equipment, high technologies and innovations: collected scientific articles of XX All-Russian scientific and technical conference*. 19–20 November 2019, Perm'. Perm'; 2019, vol. 2, p. 106–109. (In Russ.)
6. Davim JP. *Machining Composites Materials*. London – Hoboken: John Wiley & Sons; 2009, 262 p.
7. Suslov AG. *Quality of machine part surface layer*. Moscow: Mashinostroyeniye; 2000, 320 p. (In Russ.)
8. Usachev PA, Noshchenko AN. Calculation of cutting zone temperature fields. *Stanki i instrument*. 1986;2:23–24. (In Russ.)
9. Vorontsov AL, Sultan-zade NM, Albagachiev AYU, Savkin AI. Development of a new theory of thermal cutting processes. 4. Analysis of the basic thermophysical theories of cutting. Part 1. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2010;4:68–71. (In Russ.)
10. Vorontsov AL, Sultan-zade NM, Albagachiev AYU, Savkin AI. Development a new theory of thermal cutting processes. 5. General mathematical apparatus of the thermophysics of cutting. Part 1. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2010;12:65–73. (In Russ.)
11. Vorontsov AL, Sultan-zade NM, Albagachiev AYU, Savkin AI. Development of a new theory of thermal cutting processes. 5. General mathematical apparatus of the thermophysics of cutting. Part 2. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2011;1:61–67. (In Russ.)
12. Vorontsov AL, Sultan-zade NM, Albagachiev AYU, Savkin AI. Development of a new theory of thermal cutting processes. 5. General mathematical apparatus of the thermophysics of cutting. Part 3. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2011;2:74–79. (In Russ.)
13. Vorontsov AL, Sultan-zade NM, Albagachiev AYU, Savkin AI. Development of a new theory of thermal cutting processes. 6. Determining the temperature fields and contact temperatures in cutting. Part 1. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2011;3:69–74. (In Russ.)
14. Vorontsov AL, Sultan-zade NM, Albagachiev AYU, Savkin AI. Development of a new theory of thermal cutting processes. 6. Determining the temperature fields and contact temperatures in cutting. Part 3. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2011;5:63–71. (In Russ.)
15. Dimov YuV, Podashev DB. Cutting temperature when processing with elastic abrasive wheels. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2020;8:55–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-8-55-60>
16. Zaslavskiy IYa. Cutter heat conduction and temperature in cutting zone. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2015;2:70–73. (In Russ.)
17. Nasonov FA, Bukharov SV. Studying the effect of special modification of epoxy matrices and epoxy matrix-based carbon fiber composites on the temperature in the cutting zone under hole formation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(10):141–152. (In Russ.)



<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-141-152>

18. Erenkov OYu, Ivakhnenko AG. Modeling of the polymeric material stressed and strained state at cutting considering cracks interaction. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2007;5:54–56. (In Russ.)
19. Grinek AV, Rubanov VG, Kalatozishvili IV, Mikhailov VV. Numerical modeling-based study of the cutting speed influence on the temperature and force condition in the machined area. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;8:10–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-8-10-19>
20. Dudarev AS. Designs of drills and mills for diamond processings of polymeric composite materials. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Tula State University*. 2012;1:361–370. (In Russ.)
21. Sirotkin OS, Grishin VI, Litvinov VB. *Design, calculation and technology of aviation equipment connections*. Moscow: Mashinostroenie; 2006, 452 p. (In Russ.)

22. Yakimov AV, Slobodyanik PT, Usov AV. *Thermal physics of mechanical processing*. Kiev – Odessa: Lybid; 1991, 240 p.
23. Barinov DYa, Maiorova IA, Marakhovskii PS, Zuev AV, Kutsevich KE, Lukina NF. Mathematical modeling of temperature fields during curing of thick-walled fiberglass plate. *Perspektivnye materialy*. 2015;4:5–14. (In Russ.)
24. Mihajlovskij KV, Prosuncov PV, Reznik SV. On the development of space structures from high thermal conductivity polymer composite materials. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baubana*. Seriya: Mashinostroenie. 2012;9:98–106. (In Russ.)
25. Phadnis VA, Makhdom F, Roy A, Silberschmidt VV. Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation. In: *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013;47:41–51. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.11.020>

Список литературы

1. Мелентьев Р.Ю. Компьютерное моделирование теплового поля в элементарном объеме полимерных композиционных материалов // Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17. № 2. С. 3–8.
2. Дударев А.С., Свищёв В.И. Оценка температурного поля при алмазном сверлении полимерных композиционных материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 3. С. 188–194.
3. Ismail S.O., Dhakal H.N., Dimla E., Beaugrand J., Popov I. Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates // *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. Vol. 133 P. 42879. <https://doi.org/10.1002/app.42879>
4. Sadek A., Shi B., Meshreki M., Duquesne J., Attia M.H. Prediction and control of drilling-induced damage in fibre-reinforced polymers using a new hybrid force and temperature modelling approach // *CIRP Annals*. 2015. Vol. 64. Iss. 1. P. 89–92. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.074>
5. Куклин И.А., Дударев А.С., Подвинцев А.В. О расчете температурного поля при резании // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: сб. науч. тр. XX Всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 19–20 ноября 2019). Пермь, 2019. Т. 2. С. 106–109.
6. Davim J.P. *Machining Composites Materials*. London – Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 262 p.
7. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Изд-во «Машиностроение», 2000. 320 с.
8. Усачев П.А., Нощенко А.Н. Расчет температурных полей зоны резания // Станки и инструмент. 1986. № 2. С. 23–24.
9. Воронцов А.Л., Султанзаде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 4. Анализ основных теоретических исследований теплофизики резания. Часть 1 // Вестник машиностроения. 2010. № 4. С. 68–71.
10. Воронцов А.Л., Султанзаде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 5. Анализ основных теоретических исследований теплофизики резания. Часть 1 // Вестник машиностроения. 2010. № 12. С. 65–72.
11. Воронцов А.Л., Султанзаде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 5. Общий математический аппарат теплофизики резания. Часть 2 // Вестник машиностроения. 2011. № 1. С. 61–67.
12. Воронцов А.Л., Султанзаде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 5. Общий математический аппарат теплофизики резания. Часть 3 // Вестник машиностроения. 2011. № 2. С. 74–79.
13. Воронцов А.Л., Султанзаде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 6. Определение температурных полей и контактных температур при резании материалов. Часть 1 // Вестник машиностроения. 2011. № 3. С. 69–74.
14. Воронцов А.Л., Султанзаде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И. Разработка новой теории тепловых процессов резания. 6. Определение температурных полей и контактных температур при резании материалов. Часть 3 // Вестник машиностроения. 2011. № 5. С. 63–71.
15. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Температура резания при обработке эластичными абразивными кругами // Вестник машиностроения. 2020. № 8. С. 55–60. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-8-55-60>
16. Заславский И.Я. Теплопроводность резца и температура в зоне резания // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 70–73.
17. Насонов Ф.А., Бухаров С.В. Исследование влияния целевого модифицирования эпоксидных матриц и углепластиков на их основе на температуру в зоне резания при образовании отверстий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 141–152.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-141-152>

18. Еренков О.Ю., Ивахненко А.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния полимерного материала при резании с учетом взаимодействия трещин // Вестник машиностроения. 2007. № 5. С. 54–56.

19. Гринек А.В., Рубанов В.Г., Калатошвили И.В., Михайлов В.В. Исследование влияния скорости резания на температурно-силовое состояние в зоне обработки методом численного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8. С. 10–19. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-8-10-19>

20. Дударев А.С. Конструкции сверл и фрез для алмазно-абразивной обработки стеклопластиков и углепластиков // Известия Тульского государственного университета. 2012. № 1. С. 361–370.

21. Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники. М.: Изд-во «Машиностроение», 2006. 452 с.

22. Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофизика механической обработки. Киев – Одесса: Изд-во «Лыбидь», 1991. 240 с.

23. Баринев Д.Я., Майорова И.А., Мараховский П.С., Зуев А.В., Куцевич К.Е., Лукина Н.Ф. Математическое моделирование температурных полей при отверждении толстостенной плиты стеклопластика // Перспективные материалы. 2015. № 4. С. 5–14.

24. Михайловский К.В., Просунцов П.В., Резник С.В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2012. № 9. С. 98–106.

25. Phadnis V.A., Makhadmeh F., Roy A., Silberschmidt V.V. Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2013. Vol. 47. P. 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.11.020>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Dudarev,

Cand. Sci. (Eng.),

Associate Professor of the Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering,

Perm National Research Polytechnic University,

29 Komsomolsky pr., Perm 614990, Russia;

✉ e-mail: dudarev@pstu.ru

Eldar Kh. Gumarov,

Student,

Perm National Research Polytechnic University,

29 Komsomolsky pr., Perm 614990, Russia;

e-mail: eldar-gumarov1@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дударев Александр Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения»,

Пермский национальный исследовательский

политехнический университет,

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, Россия;

✉ e-mail: dudarev@pstu.ru

Гумаров Эльдар Хамитович,

студент,

Пермский национальный исследовательский

политехнический университет,

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, Россия;

e-mail: eldar-gumarov1@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article

The article was submitted 23.03.2021; approved after reviewing 07.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.03.2021; одобрена после рецензирования 07.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.



Повышение эффективности зачистки поверхностей двойной кривизны на установке с револьверной головкой

© Винь Ле Чи, В.П. Кольцов, Д.А. Стародубцева, В.Б. Ракицкая

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – разработать методику выбора рационального профиля профилированного лепесткового круга для револьверной зачистной головки для зачистки поверхностей детали с различным радиусом поперечной кривизны. Для реализации технологии изготовления крупногабаритных обводообразующих деталей специалистами Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутского авиационного завода была спроектирована и изготовлена специальная установка УДФ-4 (установка дробеударного формообразования). Данная установка оснащена системой ЧПУ и двумя рабочими органами, дробеметным аппаратом и револьверной зачистной головкой с четырьмя лепестковыми кругами. В работе предложена методика и критерии выбора профилированного лепесткового круга для зачистки обводообразующих поверхностей деталей в зависимости от радиуса кривизны последней. Для анализа был выбран лепестковый круг с оптимальным радиусом кривизны профиля 40 м, позволяющий охватить достаточно большой диапазон кривизны профиля обрабатываемых деталей (от 8 до 40 м). Установлено, что профилированные лепестковые круги шириной 100 и 200 м с радиусом профиля лепестков 40 м обеспечивают равномерный сьем материала при зачистке поверхности с радиусом кривизны от 8 до 40 м без последующего перекрытия обработанной полосы. Показано, что для повышения производительности зачистки необходимо применение более широких профилированных лепестковых кругов. В этом случае круг шириной 300 мм можно применять для участков поверхности детали с радиусом поперечной кривизны более 14 м, а круг шириной 400 мм – для участков поверхности с радиусом кривизны более 20 м. Таким образом, по результатам сравнения процесса зачистки криволинейной поверхности лепестковыми кругами прямого профиля установлено, что профилированные лепестковые круги значительно расширяют возможности использования револьверной зачистной головки установки УДФ-4.

Ключевые слова: дробеударное формообразование, зачистка, лепестковый круг, профилирование лепестковых кругов, математическая модель

Для цитирования: Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Ракицкая В.Б. Повышение эффективности зачистки поверхностей двойной кривизны на установке с револьверной головкой. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 300–308. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-300-308>

Improving stripping efficiency of double curvature surface on a setup with turret head

Vinh Le Tri, Vladimir P. Koltsov, Darya A. Starodubtseva, Valentina B. Rakitskaya

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The study was performed to develop a method for selecting a rational profile of a profiled flap wheel for a turret stripping head for cleaning parts with different radius of the transverse curvature. Researchers from the Irkutsk National Research Technical University and Irkutsk Aviation Plant designed and fabricated a special PFS-4 (peen forming setup) unit to implement manufacturing technology of large-scale contour-forming components. The unit is equipped with a CNC system, two movable operating elements, a shot blaster and a turret stripping head with four flap wheels. The paper offers methods and criteria for selecting the profiled flap wheel for stripping the contour-forming surfaces of the components, depending on the curvature radius of the latter. A flap wheel with an optimal curvature radius of 40 m was chosen for analysis, which allows a sufficiently large range of profile curvature of the processed components (from 8 to 40 m) to be covered. Profiled flap wheels 100 and 200 m wide with a flap profile radius of 40 m provided uniform material removal when cleaning the surface with a curvature radius from 8 to 40 m without further overlapping with a finished strip. It was shown that wider profiled flap wheels are necessary to increase stripping efficiency. In this case, a 300 mm wide flap wheel can be used for a component surface area with a transverse curvature radius over 14 m and a 400 mm wheel for surface areas with a curvature radius of over 20 m. Thus, comparing the stripping process of a curved surface by the straight flap wheel revealed that

profiled flap wheels significantly expand the workability of the PFS-4 unit turret stripping head.

Keywords: peen forming setup, grinding, flap wheel, profiled flap wheel, mathematical model

For citation: Le Tri Vinh, Koltsov VP, Starodubtseva DA, Rakitskaya VB. Improving stripping efficiency of double curvature surface on a setup with turret head. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):300–308. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-300-308>

ВВЕДЕНИЕ

Для получения сложных криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок, а также операций упрочнения широко применяется дробеударное формообразование и дробеударное упрочнение [1]. Зачистка абразивным лепестковым кругом после дробеударного формообразования является обязательной частью технологического процесса формообразования крупногабаритных обводообразующих поверхностей панелей и обшивок. При выполнении зачистки происходит удаление тонкого слоя материала с целью улучшения параметров шероховатости поверхности, полученной после выполнения дробеударного формообразования [1–6]. Для реализации технологии формообразования крупногабаритных обводообразующих поверхностей панелей и обшивок в рамках выполнения совместных работ сотрудниками Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутско-

го авиационного завода была разработана и эффективно применяется установка с ЧПУ УДФ-4 [2].

Для повышения производительности и гибкости процесса зачистки криволинейных поверхностей панелей и обшивок для УДФ-4 изготовлена и успешно используется револьверная зачистная головка с четырьмя лепестковыми кругами шириной 100-200-300-400 мм, соответственно [7–10]. При этом обрабатываемая поверхность разбивается на полосы обработки, ширина которых зависит от кривизны поверхности и выбора лепесткового круга, его ширины и профиля. Для поддержания постоянной величины деформации лепестков во время контакта с обрабатываемой поверхностью револьверная зачистная головка (рис. 1) имеет возможность поворота относительно горизонтальной оси по направлению подачи. Эта возможность реализуется системой управления позиционированием круга относительно поверхности.



Рис. 1. Револьверная зачистная головка для зачистки криволинейных панелей самолета на установке УДФ-4:
1 – зачистная головка; 2 – лепестковые круги; 3 – двигатель главного движения; 4 – пульт управления

Fig. 1. Turret for grinding curved aircraft panels on the UDF-4 machine-tool:
1 – grinding head; 2 – flap wheels; 3 – main motion motor; 4 – control board



При использовании лепестковых кругов цилиндрической формы для зачистки криволинейных поверхностей деформация лепестков по длине круга будет различной, с наибольшей величиной в центре круга и уменьшением по краям. Вследствие этого, воздействие абразивных зерен лепестков на поверхности пятна контакта будет различным, что, в свою очередь, приводит к неравномерному съему металла по ширине обработки. Поэтому для обеспечения равномерного съема на обрабатываемой поверхности выполняют рабочие проходы с перекрытием уже обработанной полосы с небольшим съемом, что приводит к увеличению времени обработки [11–21].

Кроме того, при зачистке с перекрытием полос достаточно сложно обеспечить равномерность съема материала на протяженности всей детали, поскольку из-за переменного радиуса поперечной кривизны по длине обрабатываемой поверхности трудно определить рациональную ширину перекрытия при каждом последующем проходе зачистки.

ЗАЧИСТКА ПРИОФИЛИРОВАННЫМ ЛЕПЕСТКОВЫМ КРУГОМ

Равномерность съема при зачистке на установке с револьверной головкой с большим успехом обеспечивает использование профилированных лепестковых кругов, радиус поперечной кривизны которых близок к радиусу кривизны обрабатываемой поверхности. При этом отпадает необходимость перекрытия следов предыдущих проходов, что, в свою очередь, повышает производительность обработки.

На рис. 2 представлена схема зачистки с помощью профилированного лепесткового круга обрабатываемой поверхности с радиусом поперечной кривизны R_p .

Из рис. 2 видно, что при вдавливании лепесткового круга в поверхность детали на величину T (величина осадки круга) лепестки изгибаются по поверхности контакта на одинаковую величину. Учитывая то, что радиус применяемого круга (175 мм) существенно превышает величину осадки (4–5 мм), лепестки по ширине контакта с поверхностью детали воздействуют на поверхность детали

равномерно, обеспечивая равномерность съема материала с обрабатываемой поверхности.

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ПРОФИЛИРОВАННОГО ЛЕПЕСТКОВОГО КРУГА ДЛЯ ЗАЧИСТКИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При зачистке поверхностей переменной кривизны лепестковым кругом необходимо выбрать радиус кривизны профиля круга равным максимальному радиусу поперечной кривизны детали. Однако при уменьшении кривизны детали образуется зазор (показан зазор a на рис. 2 *b*). Очевидно, что при сравнительно небольшом значении a , в зависимости от требований к точности контура поверхности (например, менее 0,5 мм), высокая равномерность съема материала еще обеспечивается, при увеличении a более 0,5 мм необходимо выбрать уже другой круг – с меньшим радиусом кривизны.

На рис. 3 представлена схема для расчета зазора, образованного разницей значений радиуса поперечной кривизны и радиуса кривизны профиля круга. Зазор a в данном случае представляется как максимальное расстояние от крайней точки A лепестка круга 1 до обрабатываемой поверхности детали 2 (до точки G). Очевидно, что зазор a зависит от радиуса кривизны профиля лепесткового круга R_f , радиуса кривизны поверхности детали R_p на данном участке и ширины круга, B .

Из рис. 3 следует, что

$$a = DH = CH - CD. \quad (1)$$

При этом:

$$CH = CP - HP = CP - \sqrt{GP^2 - GH^2} = R_p - \sqrt{R_p^2 - \frac{B^2}{4}}. \quad (2)$$

Аналогично:

$$CD = CF - DF = CF - \sqrt{AF^2 - AD^2} = R_f - \sqrt{R_f^2 - \frac{B^2}{4}}. \quad (3)$$

Таким образом, максимальный зазор a графически определяется следующим образом:

$$a = Rp - Rf - \sqrt{Rp^2 - \frac{B^2}{4}} + \sqrt{Rf^2 - \frac{B^2}{4}}. \quad (4)$$

На рис. 4 представлены результаты расчетов в виде графиков зависимости зазора a ,

рассчитанного по (4), при различном значении радиуса поперечной кривизны обрабатываемой поверхности детали (от 8 до 40 м) при применении четырех различных по ширине лепестковых кругов 100-200-300-400 мм с радиусом кривизны профиля лепесткового круга 40 м.

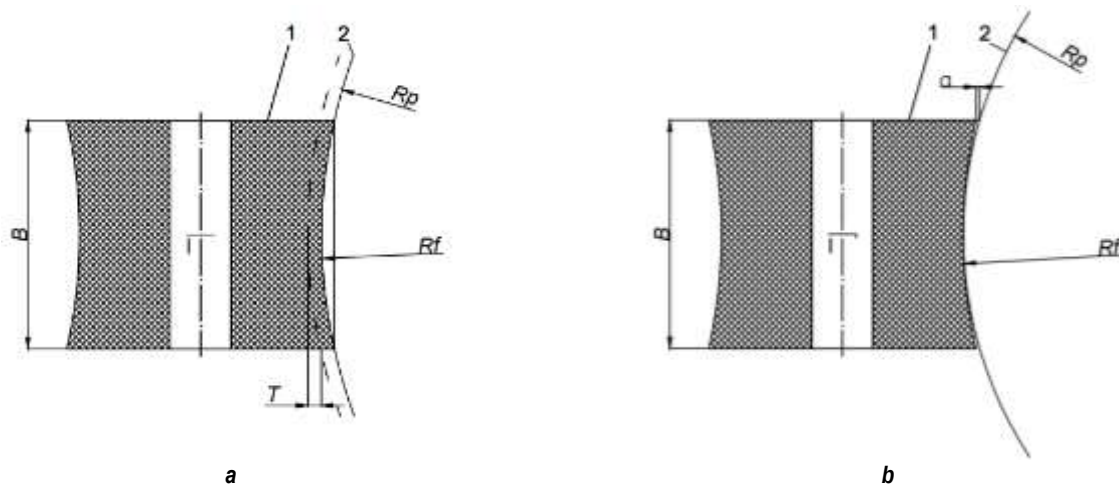


Рис. 2. Зачистка профилированным лепестковым кругом, где 1 – профилированный круг; 2 – обрабатываемая поверхность с радиусом поперечной кривизны R_p ; а – при одинаковом радиусе кривизны профиля круга и обрабатываемой поверхности; б – при разном радиусе кривизны профиля круга и обрабатываемой поверхности

Fig. 2. Grinding by a profiled flap wheel, where 1 – profiled flap wheel; 2 – machined surface with the transverse curvature radius R_p ; а – under the same curvature radius of the flap wheel profile and machined surface; б – under the different curvature radius of the flap wheel profile and machined surface

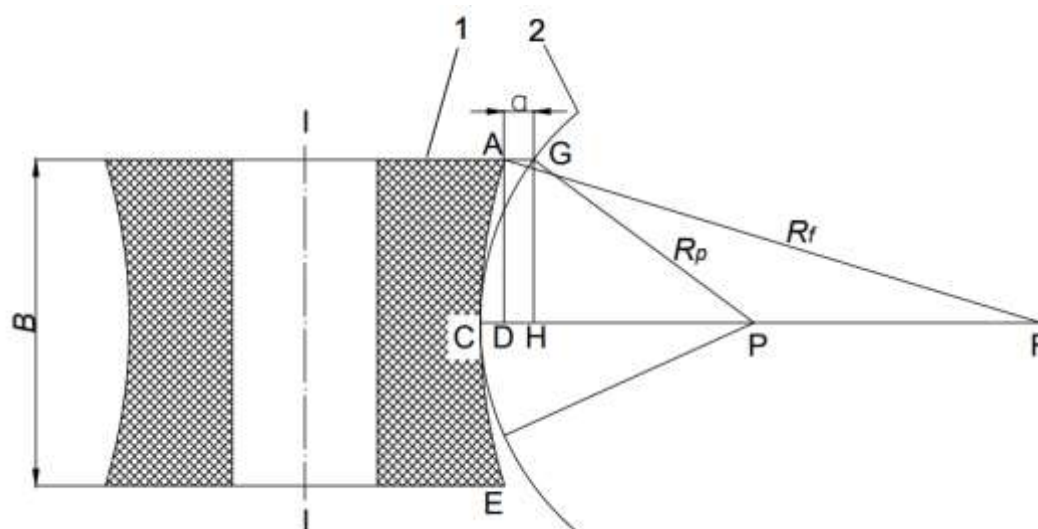


Рис. 3. Схема для расчетов зазора a при зачистке поверхности детали с радиусом поперечной кривизны меньше радиуса кривизны профиля лепесткового круга, где 1 – профилированный лепестковый круг; 2 – обрабатываемая поверхность; А – максимальный зазор; В – ширина лепесткового круга; R_f – радиус профиля лепесткового круга; R_p – радиус кривизны детали

Fig. 3. Diagram for calculating gap a during grinding the surface of a part, whose transverse curvature radius is smaller than the curvature radius of the flap wheel profile, where 1 – profiled flap wheel; 2 – machined surface; А – maximum gap; В – flap wheel width; R_f – radius of the flap wheel profile; R_p – radius of the part curvature

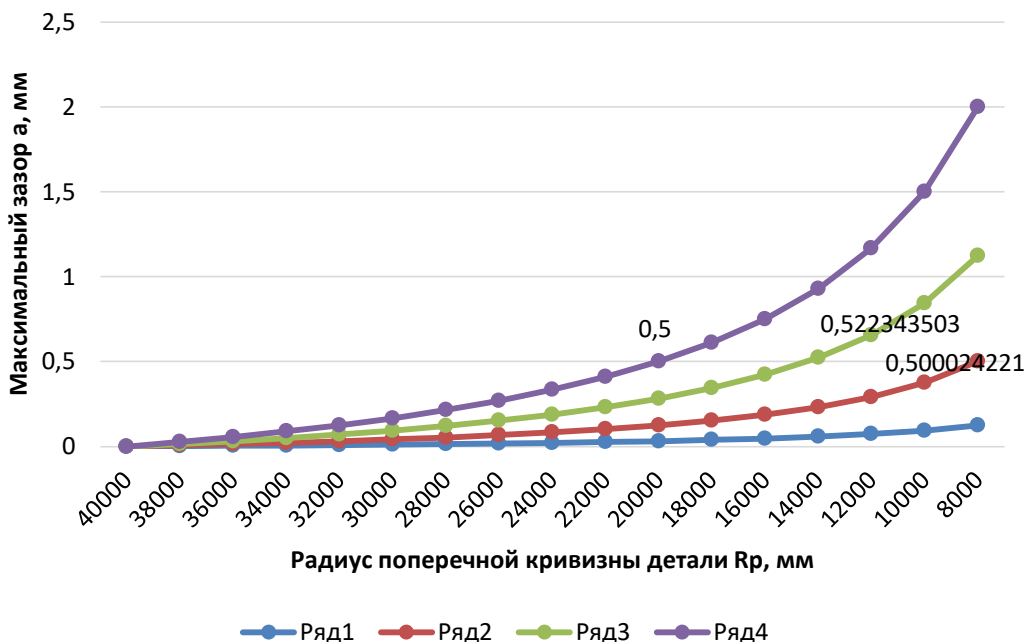


Рис. 4. Зависимость зазора a от ширины лепесткового круга с радиусом профиля 40 м и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности детали, где ряд 1 – круг шириной 100 мм; ряд 2 – круг шириной 200 мм; ряд 3 – круг шириной 300 мм; ряд 4 – для круга шириной 400 мм

Fig. 4. Dependence of the gap a on the width of the flap wheel with a profile radius of 40 m and the curvature radius of the machined part surface, where row 1 – 100 mm wide flap wheel; row 2 – 200 mm wide flap wheel; row 3 – 300 mm wide flap wheel; row 4 – 400 mm wide flap wheel

Результаты расчетов (см. рис. 4) показали, что при допускаемом значении зазора a в пределах до 0,5 мм (как предельное значение, по которому еще обеспечивается равномерный съем материала) лепестковые круги шириной 100 и 200 м с радиусом профиля лепестков 40 м могут применяться для зачистки поверхности с радиусом кривизны от 8 до 40 м без перекрытия полосы обработки. Однако для повышения производительности зачистки необходимо применение более широких профилированных лепестковых кругов, в данном случае круг шириной 300 мм можно применять для участков поверхности детали с радиусом поперечной кривизны более 14 м, а круг шириной 400 мм для участков поверхности с радиусом кривизны более 20 м.

Таким образом, по результатам сравнения процесса зачистки криволинейной поверхности лепестковыми кругами прямого профиля [22–28], профилированные лепестковые круги значительно расширяют возможности использования зачистной головки револьверной установки УДФ-4М в плане увеличения диапазоны радиуса кривизны по-

верхности детали при зачистке с более широкими кругами, что значительно сокращает время обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При зачистке сложных криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок предложение по применению профилированного лепесткового круга является весьма перспективным решением для получения максимально возможного равномерного съема материала с поверхности обрабатываемой детали.

Представленная в данной работе методика расчета величины зазора, образованного между профилем лепестков круга и обрабатываемой поверхностью деталей, позволяет определить наиболее рациональный профилированный лепестковый круг для зачистной головки револьверной для поверхностей детали с различным радиусом поперечной кривизны, обеспечивающий повышение производительности обработки и более равномерный съем материала с поверхности детали.

Список литературы

1. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Автоматизация процесса финишной обработки после дробеударного формообразования // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред. Ю.В. Димова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 28–31.
2. Пашков А.Е., Лихачев А.А., Викулова С.В. К вопросу комплексной автоматизации процесса формообразования длинномерных листовых деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 4–3. С. 21–24.
3. Пашков А.Е. О создании комплексной технологии формообразования крупногабаритных панелей // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов: материалы Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. семинара (г. Иркутск, 9–11 ноября 2011 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. С. 103–110.
4. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Козырева М.В. Анализ зависимостей съема и шероховатости поверхности детали при обработке лепестковыми кругами по результатам факторного эксперимента // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 1. С. 32–41.
5. Koltsov V., Starodubtseva D., Le Tri Vinh, Phung Xuan Son. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels // Aviaengineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference (Irkutsk, 21–26 May 2018). Irkutsk, 2018. Vol. 158. P. 386–390. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.75>
6. Дубровский П.В. Исследование процессов полирования авиационных деталей // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: тезисы докладов V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Ульяновск, 24–25 ноября 2016 г.). Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2016. С. 141–142.
7. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2005. 138 с.
8. Димов Ю.В. Перспективы использования лепестковых кругов при изготовлении деталей самолета // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред. Ю.В. Димова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 3–10.
9. Стародубцева Д.А. Револьверная головка для зачистки панелей и обшивок лепестковыми кругами после дробеударного формообразования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4. С. 34–37.
10. Пат. № 2567926, Российская Федерация, В24В 29/00 (2006.01), В24В 41/04 (2006.01). Револьверная головка для шлифования криволинейных поверхностей лепестковыми кругами / А.К. Китов, А.Е. Пашков, П.Г. Гришаев, Д.А. Стародубцева; заявители и патентообладатели Иркутский национальный исследовательский технический университет, ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут». Заявл. 27.12.2013; опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31.
11. Kalchenko V.I., Slidenikova O.S., Kalchenko D.V., Muzychka D.G. 3D-модельювання інструментів та формоутворення при шліфуванні торців непереточуваних прямокутних пластин орієнтованим кругом // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2014. № 2. Р. 55–62.
12. Кальченко В.И., Следникова О.С., Кальченко Д.В. 3D-модельювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення під час шліфування зі схрещеними осями торової поверхні і круга // Технічні науки та технології. 2015. № 2. Р. 31–38.
13. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Веремей Г.А., Следникова Е.С. Модульное 3D-моделирование инструментов, процесса съема припуска и формообразования при растачивании седел клапанов ориентированной пластинкой // В і с н и к Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2015. № 2. С. 51–60.
14. Следников О. Модульне модельювання профілів кругів, зняття припуску та формоутворення при двосторонньому шліфуванні торців некруглих деталей // Технічні науки та технології. 2016. № 3. Р. 76–84.
15. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Кологойда А.В., Кириенко С.Ю. Шлифование криволинейных поверхностей лопаток газотурбинных двигателей абразивной лентой при помощи робота с ЧПУ РМ-01 // Вестник двигателестроения. 2012. № 1. С. 181–185.
16. Воскобойников Б.С., Гречиков М.М., Гуськова Г.И. Шлифовальные технологии и высокоточное оборудование // Комплект: инструмент, технология, оборудование. 2008. № 1. С. 12–30.
17. Николаенко А.А. Повышение производительности и точности обработки при профильном глубинном шлифовании // Вестник машиностроения. 1997. № 2. С. 21–23.
18. Носенко В.А., Жуков В.К., Васильев А.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование поверхности неполного цикла с периодической правкой круга // Вестник машиностроения. 2008. № 5. С. 44–50.
19. Рыкунов Н.С., Сухов Е.И., Волков Д.И. Высокопроизводительная обработка материалов методом глубинного шлифования // Оптимизация операций механической обработки: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. С.С. Силина. Ярославль: Изд-во ЯПИ, 1984. С. 23–32.
20. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
21. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Фунг Суан Шон. Производительность зачистки поверхности лепестковым кругом после дробеударного формообразования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 874–883. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883>
22. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Чапышев А.П. К определению величины припуска при зачистке поверхности панелей и обшивок лепестковым кругом



после дробеударного формообразования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 25–30.

23. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction // International Journal of Computer Applications in Technology. 2001. Vol. 14. Iss. 1-3. P. 51–63.

<https://doi.org/10.1504/IJCAT.2001.000260>

24. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P., et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 319. P. 200–212. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>

25. Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model // International Journal of Impact En-

gineering. 2002. Vol. 27. Iss. 2. P. 119–134. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00043-4)

26. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening // Advances in Engineering Software. 2009. Vol. 40. Iss. 10. P. 1023–1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>

27. Hong T., Ooi J.Y., Shaw B. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses // Engineering Failure Analysis. 2008. Vol. 15. Iss. 8. P. 1097–1110.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.017>

28. Nougier-Lehon C., Zarwel M., Diviani C., Hertz D., Zahouani H., Hoc T. Surface impact analysis in shot peening process // Wear. 2013. Vol. 302. Iss. 1-2. P. 1058–1063. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.031>

References

1. Pashkov AE, Chapyshev AP. Automation of the finishing process after shot peening shaping. In: Dimov YuV (eds.). *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii = Improving efficiency of technological processes in mechanical engineering*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000, p. 28–31. (In Russ.)

2. Pashkov AE, Likhachev AA, Vikulova SV. To complex automation of long-size sheet part shaping. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2006;4–3: 21–24. (In Russ.)

3. Pashkov AE. On creation of an integrated technology for large panel shaping. In: *Vysokoeffektivnye tekhnologii proektirovaniya, konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki i izgotovleniya samoletov: materialy Vserossiyskogo (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskogo seminar = Highly effective technologies for aircraft design, engineering - technological preparation and manufacture: materials of All-Russian (with international participation) scientific and practical seminar*. 9–11 November 2011, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2011, p. 103–110. (In Russ.)

4. Koltsov VP, Starodubtseva DA, Kozyreva MV. Analysis of cuttings and part surface roughness dependences under flap wheel machining according to factorial experiment results. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;1:32–41. (In Russ.)

5. Koltsov V, Starodubtseva D, Le Tri Vinh, Phung Xuan Son. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels. In: *Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference*. 21–26 May 2018, Irkutsk. Irkutsk; 2018, vol. 158, p. 386–390. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.75> (In Russ.)

6. Dubrovskij PV. Study of aircraft part polishing processes. In: *Sistemy upravleniya zhiznennym ciklom izdelij aviacionnoj tekhniki: aktual'nye problemy, issledovaniya, opyt vnedreniya i perspektivy razvitiya: doklady V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Aviation engineering product life cycle control systems: actual*

problems, research, implementation experience and development prospects: abstracts of V International scientific and practical conference. 24–25 November 2016, Ul'yanovsk. Ul'yanovsk: Ulyanovsk State University; 2016, p. 141–142. (In Russ.)

7. Pashkov AE. *Technological connections under long sheet metal part manufacturing*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2005, 138 p. (In Russ.)

8. Dimov YuV. Application prospects of flap wheels in aircraft parts manufacturing. In: Dimov YuV (eds.). *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii = Improving efficiency of technological processes in mechanical engineering*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000, p. 3–10. (In Russ.)

9. Starodubtseva DA. A turret for grinding of panels and covers by flap wheel after shot peen forming. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. = Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2015;4:34–37. (In Russ.)

10. Kitov AK, Pashkov AE, Grishaev PG, Starodubtseva DA. A turret for grinding curved surfaces with flap wheels. Patent RF, no. 2567926; 2015. (In Russ.)

11. Kalchenko VI, Sliednikova OS, Kalchenko DV, Muzychka DG. 3d-modeling of tools and forming under while grinding faces of indexable rectangular plates in oriented wheel. *Visnik Chernigivskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki = Visnyk of Chernihiv State Technological University*. 2014;2:55–62. (In Russ.)

12. Kalchenko VI, Sliednikova OS, Kalchenko DV. 3D-modeling of tool, the process of removal of allowance and formation in grinding with crossed axes of torus surface and wheels. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii = Engineering Sciences and Technologies*. 2015;2:31–38. (In Russ.)

13. Kalchenko VI, Kalchenko VV, Veremey GA, Slednikova ES. Modular 3D-modeling of tools, allowance removal and formation when boring valve seats by an oriented plate. *V i s n i k Chernigivskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki = Visnyk of Chernihiv State Technological University*. 2015;2:51–60. (In Russ.)

14. Slidenkova ES. Modular modeling of wheels' profiles, stock removal and formation with bilateral grinding of ends of non-circular details. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii = Engineering Sciences and Technologies*. 2016;3:76–84. (In Russ.)
15. Kalchenko VI, Kalchenko VV, Kologoida AV, Kiriienko SYu. Grinding formed surface blade gas-turbine engine abrasive belt by the instrumentality NC ROBOT PM-01. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2012;1:181–185. (In Russ.)
16. Voskoboinikov BS, Grechikov MM, Guskova GI. Grinding technologies and high-precision equipment. *Komplekt: instrument, tekhnologiya, oborudovanie = Complect: Tool, Technology, Equipment*. 2008;1:12–30. (In Russ.)
17. Nikolaenko AA. Improving productivity and machining accuracy under profile deep grinding. *Vestnik mashinostroeniya*. 1997;2:21–23. (In Russ.)
18. Nosenko VA, Zhukov VK, Vasiliev AA, Nosenko SV. Deep grinding of incomplete-cycle surfaces, with periodic straightening of the wheel. *Vestnik mashinostroeniya*. 2008;5:44–50. (In Russ.)
19. Rykunov NS, Sukhov EI, Volkov DI. High-performance processing of materials by deep grinding method. In: Silin SS (eds.). *Optimizaciya operacij mekhanicheskoy obrabotki = Optimization of machining operations: interuniversity collection of scientific articles*. Yaroslavl: Yaroslavl Polytechnic Institute; 1984, p. 23–32. (In Russ.)
20. Starkov VK. *Grinding with highly porous wheels*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 688 p. (In Russ.)
21. Le Tri Vinh, Koltsov VP, Starodubtseva DA, Phung Xuan Son. Productivity of flap wheel grinding after shot peening. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(5):874–883. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883> (In Russ.)
22. Koltsov VP, Starodubtseva DA, Chapyshev AP. To determination of the value of the allowance during deburring abrasive mop panel surface after shot peen forming. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni A.N. Tupoleva*. 2017;73(1):25–30. (In Russ.)
23. Baragetti S. Three-dimensional finite-element procedures for shot peening residual stress field prediction. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2001;14:1-3:51–63. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2001.000260>
24. Tu Fubin, Delbergue D, Miao Hongyan, Klotz T, Brochu M, Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation. *Surface and Coatings Technology*. 2017;319:200–212. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>
25. Meguid SA, Shagal G, Stranart JC. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model. *International Journal of Impact Engineering*. 2002;27(2):119–134. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00043-4)
26. Miao HY, Larose S, Perron C, Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(10):1023–1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>
27. Hong T, Ooi JY, Shaw B. A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses. *Engineering Failure Analysis*. 2008;15(8):1097–1110. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.017>
28. Nougier-Lehon C, Zarwel M, Diviani C, Hertz D, Zahouani H, Hoc T. Surface impact analysis in shot peening process. *Wear*. 2013;302(1-2):1058–1063. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.031>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ле Чи Винь,

кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: vinh_istu@mail.ru

Кольцов Владимир Петрович,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: kolcov@istu.edu

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vinh Le Tri,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: vinh_istu@mail.ru

Vladimir P. Koltsov,

Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Mechanical Engineering
Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: kolcov@istu.edu



Стародубцева Дарья Александровна,

кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: d.star-irk@yandex.ru

Darya A. Starodubtseva,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: d.star-irk@yandex.ru

Ракицкая Валентина Борисовна,

старший преподаватель кафедры технологии
и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: rvb@istu.edu

Valentina B. Rakitskaya,

Senior Lecturer of the Department of Mechanical
Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: rvb@istu.edu

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку 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 conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена
после рецензирования 16.04.2021; принята к публика-
ции 30.06.2021.

Information about the article

The article was submitted 10.03.2021; approved after
reviewing 16.04.2021; accepted for publication
30.06.2021.



Разработка метода рационального проектирования фрикционного узла тормоза дисково-колодочного типа

© А.Е. Литвинов*, П.А. Поляков*, А.А. Голиков*, Н.А. Задаянчук**

*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия

**Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия

Резюме: Цель – разработка метода рационального проектирования фрикционного узла с наложением ограничений по минимизации маховых масс вращающихся элементов и отсутствием наступления термостабилизационного состояния. Исходными данными для расчета являлись тормозной момент, удельное давление в паре трения, угловая скорость и диаметр ступицы тормозного диска. Для расчета конструктивных и эксплуатационных параметров тормоза дисково-колодочного типа на предварительном этапе применялся метод геометрического программирования. Затем уточнялись параметры, исходя из условий взаимоисключающих факторов (энергоемкость и время торможения) и напряженно-деформированного состояния. На основе алгоритма метода рационального проектирования фрикционного узла была разработана программа для расчета на языке программирования DELPHI. На предварительном этапе проектирования определены диапазоны конструктивных параметров: диаметр тормозного диска – от 0,237 до 0,37 м; ширина рабочих поверхностей – от 0,0335 до 0,1 м; толщина полу-дисков – от 0,012 до 0,026 м. Окончательным результатом метода рационального проектирования явились уточненные диапазоны конструктивных параметров: диаметр – от 0,31 до 0,324 м; ширина – от 0,041 до 0,0485 м; толщина – от 0,0148 до 0,0151 м. Установлено, что разработанный метод рационального проектирования уменьшает диапазоны диаметра проектируемого тормозного диска по сравнению с предварительным расчетом в 9,5 раза, тогда как диапазоны ширины рабочих поверхностей снижаются в 8,9 раза, а диапазон толщины – в 46,6 раза. На завершающем этапе используемого метода были определены второстепенные конструктивные и эксплуатационные параметры фрикционного узла: площади рабочей и нерабочей поверхностей пар трения, коэффициент их взаимного перекрытия. Предложенный метод рационального проектирования уменьшает выборный диапазон конструктивных параметров, что позволит обеспечить более рациональный выбор соответствия их заданным эксплуатационным характеристикам. Разработанный метод предлагает проектирование фрикционного узла тормоза дисково-колодочного типа на основе ограничений по металлоемкости и наступлению термостабилизационного состояния.

Ключевые слова: тормозной диск, геометрическое программирование, термостабилизационное состояние, маховые массы, энергоемкость

Для цитирования: Литвинов А.Е., Поляков П.А., Голиков А.А., Задаянчук Н.А. Разработка метода рационального проектирования фрикционного узла тормоза дисково-колодочного типа. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 309–319. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-309-319>

Rational design for a friction unit of a disc-shoe brake

Artem E. Litvinov*, Pavel A. Polyakov *, Aleksey A. Golikov*, Nina A. Zadayanchuk**

*Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

**Kuban State University, Krasnodar, Russia

Abstract: In this study, we develop a rational design for a friction unit provided that restrictions are imposed on the fly-wheel masses of rotating elements and the onset of a thermal stabilization state. The input calculation data were the braking torque, specific pressure in the friction pair, angular velocity and the diameter of the brake disc hub. The geometric programming method was used at the preliminary stage to calculate the design and operational parameters of a disc-shoe brake. Further, the parameters were refined based on the conditions of mutually exclusive factors (energy intensity and braking time) and the stress-strain state. On the basis of the proposed rational design for a friction unit, a software application for calculating in the DELPHI programming language was developed. The ranges of design parameters were determined at the preliminary design stage: a brake disc diameter from 0.237 to 0.37 m; the width of working surfaces from 0.0335 to 0.1 m; and the thickness of half-discs from 0.012 to 0.026 m. The final result of the rational design method was the specified ranges of design parameters: diameter from 0.31 to 0.324 m; width from 0.041 to 0.0485 m; and thick-

ness from 0.0148 to 0.0151 m. The developed method of rational design reduces the diameter ranges of the designed brake disc in comparison with the preliminary calculation by 9.5 times, while the ranges of the width of the working surfaces are reduced by 8.9 times, and the thickness range – by 46.6 times. At the final stage, the secondary design and operational parameters of the friction unit were determined: the areas of the working and non-working surfaces of the friction pairs and the coefficient of their mutual overlap. The proposed method of rational design reduces the selected range of design parameters, which will provide a more rational choice of compliance with their specified performance characteristics.

Keywords: brake disc, geometric programming, thermal stabilization state, flyweight, energy consumption

For citation: Litvinov AE, Polyakov PA, Golikov AA, Zadayanchuk NA. Rational design for a friction unit of a disc-shoe brake. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):309–319. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-309-319>

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении в достаточном количестве применяются различные типы фрикционных узлов тормозных механизмов. Объединяющим компонентом всех фрикционных узлов является сила трения и ее производные эксплуатационные параметры. В результате трения в тормозных механизмах побочным продуктом при их работе является образование тепла, главным критерием которого является температура на рабочих поверхностях фрикционного узла тормозного механизма. Многие исследования информируют о влиянии температуры на эксплуатационные параметры пар трения тормозного механизма. В целом все работы, посвященные изучению тормозных механизмов, можно классифицировать на три направления:

- 1) посвящено эксплуатационным параметрам, влияющим на энергонагруженность пар трения тормозов;
- 2) заключается в борьбе с энергонагруженностью с помощью различных способов охлаждения;
- 3) связано с управлением тормозным механизмом.

В работе [1, 2] авторы приводят исследование, посвященное влиянию скорости скольжения и температуры контакта на стабильность коэффициента трения. В исследовании [3] уделяется внимание влиянию диссипаций на нестабильную работу тормозной системы. В рамках статьи [4] приводится решение прямой задачи по проектированию профиля геометрии пар трения с достижением наилучших параметров распределения давления по площади контакта. В исследо-

ваниях [5, 6] авторы приводят решение обратной задачи с определением геометрии поверхности трения фрикционного узла от режима трения и распределения удельного давления в парах трения различных типов тормозов. В работе [7] описывается влияние колебаний и тепловых процессов на износофрикционные параметры пар трения ленточно-колодочного тормоза. В рамках лабораторных исследований [8] определена оценка линейного износа для реального фрикционного узла дисково-колодочного тормоза.

В рамках второго направления приведены исследования [9–13], в которых температура играет роль входного параметра и оценивается теплоотдача от различных типов вентиляционного аппарата. В исследовании [14] производится расчет коэффициентов теплоотдачи от значений поверхностной температуры двух контактирующих тел, в [15] показан расчет параметров вентилируемых тормозных дисков, в [16] приводится расчет количества воздуха, проходящего через вентиляционный аппарат тормозного диска от его геометрических параметров.

Работы, связанные с управлением тормозной системой или, в частности, с тормозным механизмом, также широко представлены в отечественных и зарубежных статьях. В литературном источнике [17] представлено разработанное рекуперативное устройство для пневматической тормозной системы. В исследовании [18] приводится электронная система управления тормозной системы автомобиля.

После анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что исследова-



ния представляют собой отдельные расчеты параметров тормоза. Конструктивные параметры рассчитываются от одного или двух эксплуатационных параметров. Отсутствуют методы проектирования пар трения фрикционных узлов тормозов. Методика определения конструктивных параметров из эксплуатационных показателей тормоза не предполагает наличия каких-либо ограничений. В результате чего необходимо сформулировать цель исследования – это разработка метода рационального проектирования фрикционных узлов тормозного механизма с учетом ограничений по минимизации маховых масс вращающегося металлического фрикционного элемента и отсутствия термостабилизационного состояния.

АЛГОРИТМ МЕТОДА РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФРИКЦИОННЫХ УЗЛОВ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Для выполнения разработки метода рационального проектирования фрикционных узлов тормоза дисково-колодочного типа, работающего в различных режимах торможения, необходимо разработать алгоритм. Режимы торможения могут быть однократными (апериодическими или длительными) и повторно-кратковременными. Задача по проектированию фрикционного узла является многокритериальной. Решение этой задачи заключается во всестороннем анализе фрикционных узлов, содержащих теоретические зависимости по оценке их конструктивных и эксплуатационных параметров.

Для разработки метода проектирования необходимо наложить следующие ограничения:

Первым ограничением являются габаритные размеры пары трения тормоза дисково-колодочного типа. Из большого числа критериев (диаметр, толщина, ширина рабочей накладки, плотность материала тормозного диска, площади рабочей и нерабочей поверхностей тормозного диска), которые могут оказывать влияние на габаритные размеры тормозного механизма, однозначно можно выделить массу вращающегося металлического элемента фрикционного узла ($m_{m\partial}$).

Вторым ограничением можно считать

определяющий критерий, который влияет на эксплуатационные параметры тормозного механизма. К эксплуатационным показателям тормоза дисково-колодочного типа, помимо тормозного момента, удельного давления и коэффициента трения, относятся показатели теплового состояния. В качестве показателей теплового состояния первым является температура на поверхности рабочих пар трения (ограничивается температурой деструкции материалов фрикционной накладки t_n), вторым параметром считается момент наступления термостабилизационного состояния тормозного диска (условие возникновения при равенстве подведенной и отведенной энергии от пар трения).

Опираясь на ранее разработанные методы проектирования фрикционных узлов барабанно-колодочного типа [19], разработан алгоритм поэтапного рационального проектирования [5], представленный на рис. 1.

Первым этапом задается диапазон исходных данных и материал, из которого будут изготавливаться металлический и неметаллический элементы фрикционного узла. В список исходных параметров включают удельные нагрузки на рабочей поверхности тормозного диска ($p_{m\partial}$), необходимый тормозной момент фрикционного узла (M_T), предельную угловую скорость тормозного диска ($\omega_{m\partial}$), диаметр ступицы (d_{cm}).

Диапазоны исходных данных представлены далее.

Вторым этапом производится определение основных геометрических параметров тормозного диска (диаметр D , рабочая ширина B и толщина δ):

$$\begin{cases} p'_{m\partial} \leq p_{m\partial} \leq \overline{p_{m\partial}}; \\ M'_T \leq M_T \leq \overline{M_T}; \\ d'_{cm} \leq d_{cm} \leq \overline{d_{cm}}; \\ \omega'_{m\partial} \leq \omega_{m\partial} \leq \overline{\omega_{m\partial}}. \end{cases} \quad (1)$$

$$D = \frac{d_{cm}}{2} + \sqrt{\frac{d_{cm}^2}{4} + \frac{8M_T}{f[p]}}; \quad (2)$$

$$B = \frac{D}{2} - \frac{d_{cm}}{2}; \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{6M_T}{[\sigma_{из}]B}}; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} D' &\leq D \leq \bar{D} \\ B' &\leq B \leq \bar{B} \\ \delta' &\leq \delta \leq \bar{\delta} \end{aligned} \right\} \alpha'_i \leq \alpha_i \leq \bar{\alpha}_i; (i=1, 2, 3), \quad (5)$$

где f – коэффициент трения материала фрикционного узла; $[p]$ – допустимое давление (выбирается из условия (1)), МПа; $[\sigma_{из}]$ – допустимое напряжение при изгибе, МПа.

После определения основных конструктивных параметров необходимо уделить внимание второстепенным конструктивным и эксплуатационным параметрам: площади

рабочей поверхности тормозного диска ($A_{pm\delta}$) и фрикционной накладки ($A_{pфн}$), площади нерабочей поверхности тормозного диска (с учетом ребер вентиляционного аппарата) ($A_{нm\delta}$) и площади нерабочей поверхности фрикционной накладки ($A_{нфн}$), коэффициенту отношения рабочей и нерабочей поверхностей тормозного диска (K), коэффициенту взаимного перекрытия пар трения ($K_{\theta 3}$), силе трения ($F_{тр}$), работе трения ($W_{тр}$). Окончательный расчет будет выполнен, когда конструктивные параметры будут удовлетворять всем наложенным ограничениям разработанного метода.

$$A_{pm\delta} = \frac{\pi}{4}(2DB - B^2); \quad (6)$$

$$A_{нm\delta} = \frac{\pi}{4}(2DB - B^2) + 2n\delta(d - B); \quad (7)$$

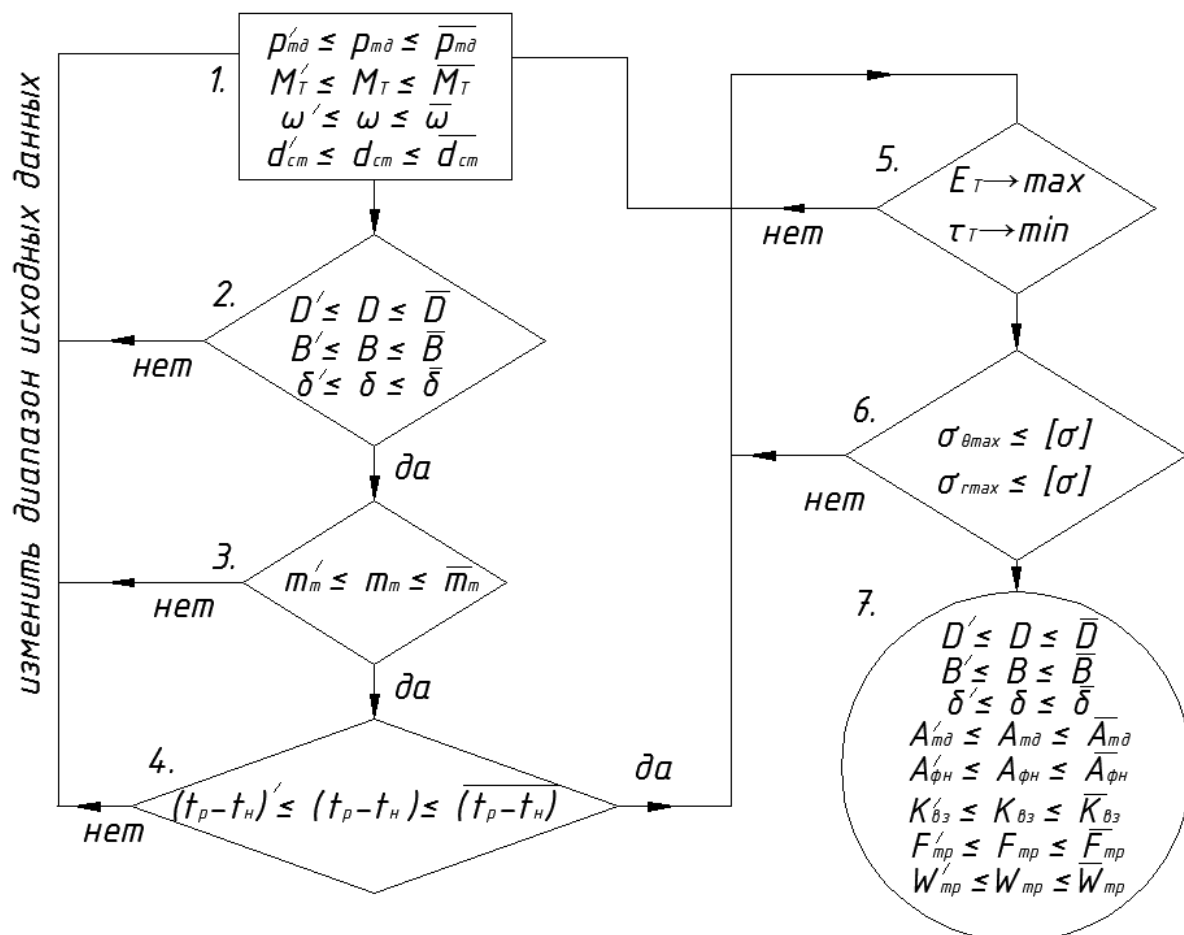


Рис. 1. Алгоритм метода рационального проектирования фрикционного узла тормоза дисково-колодочного типа
Fig. 1. Algorithm of the rational design method of the disc-shoe brake friction unit



$$A_{pфн} = A_{нфн} = \frac{\pi}{4} (2DB - B^2) \frac{\alpha}{360^\circ}; \quad (8)$$

$$K = \frac{A_{pмд}}{A_{нмд}} = \frac{\frac{\pi}{4} (2DB - B^2)}{\frac{\pi}{4} (2DB - B^2) + 2n\delta(d - B)}; \quad (9)$$

$$K_{вз} = \frac{A_{pфн}}{A_{pмд}} = \frac{\frac{\pi}{4} (2DB - B^2) \frac{\alpha}{360^\circ}}{\frac{\pi}{4} (2DB - B^2)}; \quad (10)$$

$$F_{mp} = fp \frac{\pi}{4} (2DB - B^2) \frac{\alpha}{360^\circ}; \quad (11)$$

$$W_{mp} = fp\omega \frac{\pi}{4} (2DB - B^2) \frac{\alpha}{360^\circ} \tau, \quad (12)$$

где τ – время торможения, с.

Для реализации метода многокритериальности из количества геометрических параметров тормозного диска необходимо с помощью метода геометрического программирования сформулировать две целевые функции: первая $f_o(D, B, \delta)$ будет минимизировать маховые массы металлического фрикционного элемента, вторая $f_o'(D, B, \delta)$ – мини-

мизировать наступление термостабилизационного состояния и увеличивать энергоемкость фрикционного узла.

Маховые массы характеризуются моментом инерции, который определяется произведением массы на квадрат радиуса от центра вращения до центра масс:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2, \quad (13)$$

где m_i – масса i -го элемента тормозного диска, кг; r_i – радиус от центра вращения до центра масс i -го элемента тормозного диска, м.

Термостабилизационное состояние – это состояние, при котором аккумулируемое тепло становится равным по величине отведенной от поверхностей паре трения. Критерием, отвечающим за наступление термостабилизационного состояния, является разница между температурой на рабочей поверхности и температурой нерабочих поверхностей ($t_p - t_n$). Чем больше будет разница температур, тем меньше возможность наступления явления термостабилизации.

Для реализации метода геометрического программирования формулируются целевые функции $f_o(D, B, \delta)$ и $f_o'(D, B, \delta)$:

$$f_o(D, B, \delta) \rightarrow \min; \quad D > 0; B > 0; \delta > 0; \quad (15)$$

$$f_o(D, B, \delta) = \sum_{i \in 2} c_i \prod_j D^{a_{ij}} \cdot B^{a_{ij}} \delta^{a_{ij}}; \quad i = 1; \quad c_i > 0; \quad (16)$$

$$f_o'(D, B, \delta) \rightarrow \max; \quad D > 0; B > 0; \delta > 0; \quad (17)$$

$$f_o'(D, B, \delta) = \sum_{i \in 2} c_i \prod_j D^{a_{ij}} \cdot B^{a_{ij}} \delta^{a_{ij}}; \quad i = 1; \quad c_i > 0; \quad (18)$$

$$f_o(D, B, \delta) = c_1 \left[\frac{\pi \rho \delta}{4} (2DB - B^2) + \frac{\pi D \delta B}{n} \right] \rightarrow \min; \quad (19)$$

$$f_o'(D, B, \delta) = c_2 \left[\frac{2\pi B \lambda}{\ln\left(\frac{D}{D-B}\right)} + \alpha \pi B D + \frac{\pi \delta}{4\lambda} (2DB - B^2) \right] \rightarrow \max. \quad (20)$$

Метод геометрического программирования может реализовать рациональные конструктивные параметры тормозного диска.

Геометрическое решение метода геометрического программирования показано на рис. 2. Конструктивные параметры тормозного диска составляют ребра параллелепипеда π , состоящего из множества точек, удовлетворяющих условиям (5). После введения ограничений, налагаемых целевой функцией $f_o(D, B, \delta)$, из параллелепипеда π выделяется подмножество G , точки которого удовлетворяют как параметрическому множеству (5), так и ограничениям маховых масс (19):

$$m'_m \leq m_m \leq \overline{m_m}, \quad (21)$$

после необходимо проверить конструктивные параметры на отсутствие термостабилизационного состояния:

$$(t_p - t_n)' \leq (t_p - t_n) \leq \overline{(t_p - t_n)}. \quad (22)$$

Для этого из подмножества G выделяют множество D (рис. 2), точки которого удовлетворяют условиям максимизации по

разнице температур (22) и целевой функции $f_o'(D, B, \delta)$ (20).

Решением метода рационального проектирования является определение диапазона конструктивных параметров исходя из двух взаимоисключающих факторов: максимизации энергоемкости и минимизации времени торможения.

Энергоемкость пар трения характеризует количество энергии, аккумулируемое на рабочих поверхностях тормозного диска. Поэтому от увеличения энергоемкости зависит эффективность фрикционного узла тормозного механизма. Общая энергоемкость тормозного механизма рассчитывается по формуле:

$$E_T = \frac{W_{mp}}{t_n}, \quad (23)$$

где t_n – поверхностная температура фрикционного узла, °C.

$$E_T = \left[fp\omega \frac{\pi}{4t_n} (2DB - B^2) \frac{\alpha}{360^\circ} \tau \right]. \quad (24)$$

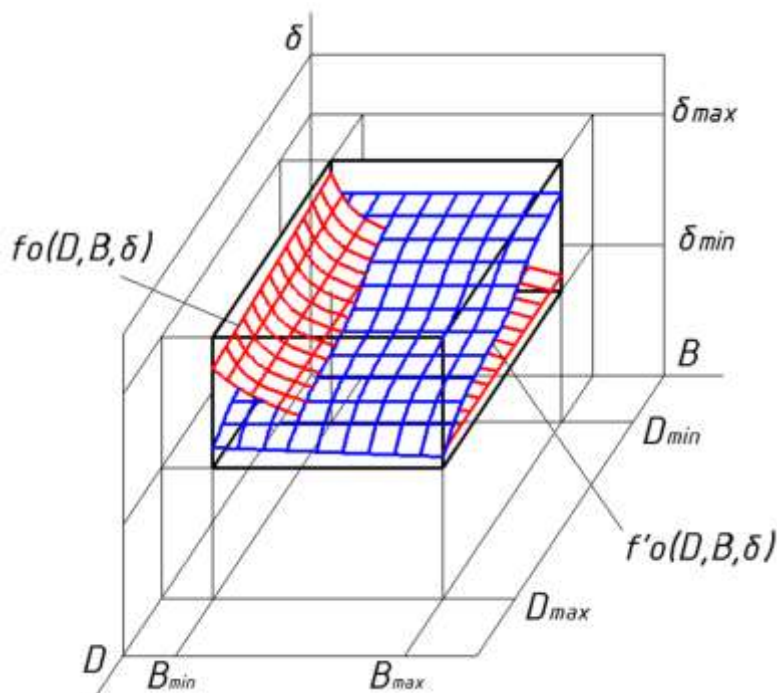


Рис. 2. Схема решения методом геометрического программирования
 Fig. 2. Decision diagram by the geometric programming method

Среди допустимых точек множества D должно существовать несколько оптимальных точек, которые отвечают решению метода рационального проектирования. Эти точки находятся в диапазоне с шагом от точки пересечения взаимоисключающих факторов (рис. 3). Шаг возможно задать при решении метода рационального проектирования.

В итоге проводят проверку на соответствие условию напряженно-деформированного состояния полученных конструктивных параметров тормозного диска (25), (26).

Для оценки напряженно-деформированного состояния рассчитывается окружное σ_θ и радиальное σ_r напряжения:

$$\sigma_{\theta \max} = \frac{\gamma \omega^2}{4g} \left[\frac{D^2}{4} (3 + \mu) + \frac{d_{cm}^2}{4} (1 - \mu) \right] \leq [\sigma]; \quad (25)$$

$$\sigma_{r \max} = \frac{3 + \mu}{8} \cdot \frac{\gamma \cdot \omega^2}{g} \left(\frac{D}{2} - \frac{d_{cm}}{2} \right)^2 \leq [\sigma], \quad (26)$$

где γ – вес единицы объема материала диска; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; μ – коэффициент Пуассона для материала тормозного диска.

Разработанный метод рационального проектирования [19] при заданных исходных данных дает возможность количественно оценить функциональные эксплуатационные

параметры, показатели спроектированных тормозных механизмов дисково-колодочного типа при варьировании их конструктивными параметрами в заданных границах с учетом двух взаимоисключающих факторов.

Согласно алгоритму разработанного метода рационального проектирования фрикционных узлов тормоза дисково-колодочного типа, разработана программа с использованием языка программирования DELPHI.

В качестве исходных данных был выбран диапазон тормозного момента на примере грузового автомобиля от 1540 до 2130 Нм. Удельные нагрузки находились в граничных пределах от 1,0 до 3,5 МПа. Угловая скорость изменялась в пределах от 29,8 до 43,2 с^{-1} . Диаметр ступицы выбирался из границ, заключенных в диапазоне от 0,17 до 0,22 м. Коэффициент трения материала фрикционной накладки равен 0,3 [20]. Моделируемая предельная температура рабочих пар трения в процессе торможения задавалась равной 250°C, которая соответствует предельной температуре деструкции материала фрикционных накладок тормозного механизма. В качестве материала тормозного диска выбираем серый литой чугун Gh190. Результат расчета с помощью метода рационального проектирования фрикционного узла представлен в таблице.

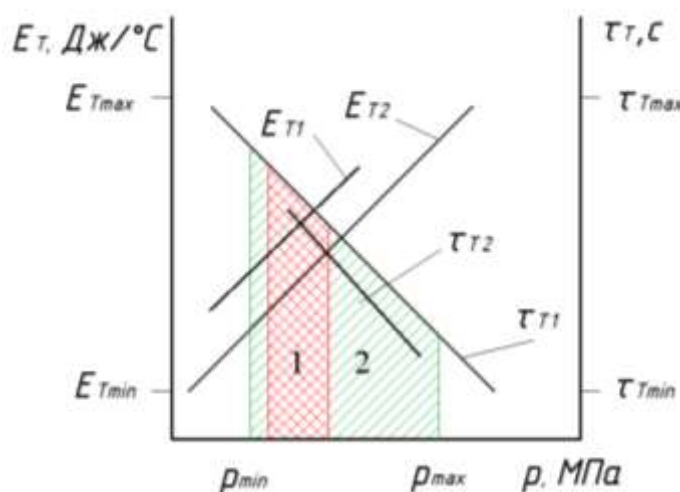


Рис. 3. Схема решения методом взаимоисключающих факторов: 1 – для повторно-кратковременного, 2 – для длительного режима торможения

Fig. 3. Decision diagram by the method of mutually exclusive factors: 1 – for intermittent braking mode, 2 – for extended braking mode

Результаты проектирования фрикционных узлов тормоза дисково-колодочного тормоза с рациональными конструктивными и эксплуатационными параметрами

Results of designing friction units of the disc-shoe brake with rational design and operational parameters

Исходные параметры			Ограничения по массе тормозного диска		
–	пределы			пределы	
	нижний	верхний		нижний	верхний
p , МПа	1,0	3,5	$m_{тд}$, кг	14,4	22,1
M_T , Нм	1540	2130	Ограничения по тепловой нагруженности тормозного диска		
ω , с ⁻¹	29,8	43,2		пределы	
$d_{см}$, м	0,17	0,22		нижний	верхний
t_p , °C	–	250	$t_p - t_n$, °C	54	98
Основные конструктивные параметры после первого этапа проектирования			Диапазон, определяемый условием взаимоисключающих факторов		
B , м	0,0335	0,1		пределы	
δ , м	0,012	0,026		нижний	верхний
D , м	0,237	0,37	T_T , с	25,0	30,0
Результаты метода рационального проектирования фрикционного узла тормоза дисково-колодочного типа			Ет, кДж/°C	0,65	0,88
B , м	0,041	0,0485	$A_{ртд}$, м ²	0,0204	0,0225
δ , м	0,0138	0,0151	$A_{рфн}$, м ²	0,0011	0,00187
D , м	0,31	0,324	K	1	1
–			$K_{вз}$	0,05	0,083
			$F_{тп}$, кН	0,321	1,96
			$W_{тп}$, кДж	9,56	84,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод рационального проектирования фрикционных узлов тормозов дисково-колодочного типа. Произведенный метод основан на определении диапазона рациональных конструктивных параметров пар трения тормозного механизма дисково-колодочного типа исходя из заданного диапазона конструктивных и эксплуатационных данных. Метод базируется на зависимостях основных конструктивных параметров (диаметр тормозного диска, его толщина и ширина рабочей поверхности) от тормозного момента, угловой скорости и удельных нагрузок в паре трения. В процессе проектирования на геометрические размеры налагаются с помощью метода геометрического проектирования следующие ограничения: минимизация момента инерции тормозного диска [6–8], а именно – снижение маховых масс; отсутствие наступления явления термостабилизации в металлическом фрикционном элементе. В дальнейшем диапазон конструктивных параметров уточнялся исходя из условия взаимоисключающих факторов: увеличения энергоемкости фрикционного узла и уменьшения времени торможения. В заключительном этапе проводился проверочный расчет напряженно-

деформированного состояния. При подстановке диапазона исходных данных использовали программу, разработанную на основе алгоритма предложенного метода. После предварительного расчета конструктивных параметров диапазон значений составлял: диаметр тормозного диска – от 0,237 до 0,37 м; ширина рабочих поверхностей – от 0,0335 до 0,1 м; толщина – от 0,012 до 0,026 м.

После применения методов геометрического программирования и взаимоисключающих факторов диапазоны конструктивных параметров составили: диаметр – от 0,31 до 0,324 м; ширина – от 0,041 до 0,0485 м; толщина – от 0,0148 до 0,0151 м.

Интервалы геометрических параметров тормозного диска после предварительного расчета:

$$\Delta D = D_{\max} - D_{\min} = 0,37 - 0,237 = 0,133 \text{ м};$$

$$\Delta B = B_{\max} - B_{\min} = 0,1 - 0,0335 = 0,0665 \text{ м}; \quad (27)$$

$$\Delta \delta = \delta_{\max} - \delta_{\min} = 0,026 - 0,012 = 0,014 \text{ м}.$$

Интервалы геометрических параметров тормозного диска после применения методов геометрического программирования и взаимоисключающих факторов:



$$\begin{aligned}\Delta D' &= D_{\max} - D_{\min} = 0,324 - 0,31 = 0,014 \text{ мм}; \\ \Delta B' &= B_{\max} - B_{\min} = 0,0485 - 0,041 = 0,0075 \text{ мм}; \\ \Delta \delta' &= \delta_{\max} - \delta_{\min} = 0,0151 - 0,0148 = 0,0003 \text{ мм}.\end{aligned}\quad (28)$$

Отношение интервалов геометрических параметров до и после применения методов геометрического программирования и взаимоисключающих факторов:

$$\begin{aligned}I_1 &= \frac{\Delta D}{\Delta D'} = \frac{0,133}{0,014} = 9,5; \\ I_2 &= \frac{\Delta B}{\Delta B'} = \frac{0,0665}{0,0075} = 8,9; \\ I_3 &= \frac{\Delta \delta}{\Delta \delta'} = \frac{0,014}{0,0003} = 46,6.\end{aligned}\quad (29)$$

Таким образом, диапазоны рациональных конструктивных параметров по сравнению с предварительным этапом для диаметра тормозного диска были уменьшены в 9,5 раза; для ширины рабочих поверхностей уменьшены в 8,9 раза; для толщины металлического фрикционного элемента уменьшены в 46,6 раза. На основании этого можно сделать заключение, что разработанный метод рационального проектирования [19] снижает вариативность конструктивных параметров, обеспечивая снижение металлоемкости и препятствуя наступлению термостабилизационного состояния.

Список литературы

1. Nosko O. Analytical study of sliding instability due to velocity- and temperature-dependent friction // *Tribology Letters*. 2016. Vol. 61. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0628-9>
2. 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>
3. Úradníček J., Musil M., Bachratý M., Havelka F. Destabilization of disc brake mechanical system due to nonproportional damping // *Engineering Mechanics*. 2020: Proceedings 26th International Conference (Brno, 24–25 November, 2020). Brno, 2020. Vol. 26. P. 496–499. <https://doi.org/10.21495/5896-3-496>
4. Polyakov P.A., Litvinov A.E., Polyakova E.A., Fedotov E.S., Tagiev R.S. Design of surface profile of pairs of friction unit // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 843. P. 012001.
5. Марков А.М., Габеев А.В., Иванов А.В., Габеев Д.А. Методика исследования характеристик пары трения фрикционного узла поглощающего аппарата // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2018. Т. 5. № 3-4. С. 137–143.
6. Поляков П.А., Федотов Е.С., Полякова Е.А., Голиков А.А., Виниченко В.О. Математическое моделирование удельного давления тормозного механизма // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2020. № 5. С. 20–25. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-5-20-25>
7. Вольченко Д.А. Волновая природа изменения параметров металлополимерных пар трения тормозных устройств при фрикционном взаимодействии // *Вісник Севастопольського національного технічного університету*. 2014. Вип. 152. С. 14–22.
8. Бевз О., Магопек С., Матвиенко А. Исследование надежности тормозного механизма автомобиля Hyundai Accent // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 1(32). С. 68–78. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).68-78](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).68-78)
9. 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>
10. Panelli M. 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>
11. 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. No. 4. P. 045001. <https://doi.org/10.1115/1.4004931>
12. Yan H.B., Zhang Q.C., Lu T.J. Heat transfer enhancement by X-type lattice in ventilated brake disc // *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 107. P. 39–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.026>
13. Mew T.D., Kang Ki-Ju, Kienhöfer F.W., Kim T. Transient thermal response of a highly porous ventilated brake disc // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2015. Vol. 229. P. 674–683. <https://doi.org/10.1177/0954407014567516>
14. 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>

15. Volchenko N., Volchenko A., Volchenko D., Poliakov P., Malyk V., Zhuravliov D., et al. Features of the estimation of the intensity of heat exchange in selfventilated diskshoe brakes of vehicles // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1. No. 5. P. 47–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154712>
16. Литвинов А.Е., Поляков П.А., Полякова Е.А., Тагиев Р.С., Федотов Е.С., Голиков А.А. Разработка методики оценки системы охлаждения тормозных дисков // *Вестник Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова*. 2020. Т. 23. № 1. С. 14–22. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-1-14-22>
17. Shailendra Pratar V., Siddharth S., Shwetang D., Rishi A. Pneumatic Braking Mechanism // *engrXiv. Preprints*.

<https://doi.org/10.31224/osf.io/5dtz2>
18. Victoria R., Petrescu V. Mechatronic systems to the braking mechanisms // *Journal of Mechatronics and Robotics*. 2020. Vol. 4. № 1. P. 156–190. <https://doi.org/10.3844/jmrsp.2020.156.190>
19. Поляков П.А., Федотов Е.С., Полякова Е.А. Метод проектирования современных тормозных механизмов с сервоусилением // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 7. С. 39–50. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-39-50>
20. Braun O.M. Modern understanding of the frictional mechanisms // *Visnik National Academy Nauk Ukraine*. 2012. № 12. P. 12–18. <https://doi.org/10.15407/vsn2012.12.012>

References

1. Nosko O. Analytical study of sliding instability due to velocity- and temperature-dependent friction. *Tribology Letters*. 2016;61. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0628-9>
2. 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>
3. Úradníček J, Musil M, Bachratý M, Havelka F. Destabilization of disc brake mechanical system due to nonproportional damping. In: *Engineering Mechanics 2020: Proceedings 26th International Conference*. 24–25 November 2020, Brno. Brno; 2020, vol. 26, p. 496–499. <https://doi.org/10.21495/5896-3-496>
4. Polyakov PA, Litvinov AE, Polyakova EA, Fedotov ES, Tagiev RS. Design of surface profile of pairs of friction unit. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;843:012001.
5. Markov AM, Gabets AV, Ivanov AV, Gabets DA. Methods of research of characteristics of friction pair of the friction unit draft gear. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual Problems in Machine Building*. 2018;5(3-4):137–143. (In Russ.)
6. Polyakov PA, Fedotov ES, Polyakova EA, Golikov AA, Vinichenko VO. Mathematical modeling of brake specific pressure. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020;5:20–25. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-5-20-25>
7. Volchenko DA. The wave nature change parameters of metal-polymer pairs friction of braking devices at frictional interaction. *Vestnik Sevastopol'skogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Sevastopol National Technical University*. 2014;152:14–22.
8. Bezv O, Magopec S, Matvienko A. The study of the reliability of the brake mechanism of the car Hyundai Accent. *Central'noukraïns'kij naukovij visnik. Tekhnichni nauki = Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2019;1(32):68–78. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).68-78](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).68-78)
9. 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>

10. Panelli M. 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>
11. 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;3(4):045001. <https://doi.org/10.1115/1.4004931>
12. Yan HB, Zhang QC, Lu TJ. Heat transfer enhancement by X-type lattice in ventilated brake disc. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;107:39–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.026>
13. Mew TD, Kang Ki-Ju, Kienhöfer FW, Kim T. Transient thermal response of a highly porous ventilated brake disc. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2015;229:674–683. <https://doi.org/10.1177/0954407014567516>
14. 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>
15. Volchenko N, Volchenko A, Volchenko D, Poliakov P, Malyk V, Zhuravliov D, et al. Features of the estimation of the intensity of heat exchange in selfventilated diskshoe brakes of vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019;1(5):47–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154712>
16. Litvinov AE, Polyakov PA, Polyakova EA, Tagiev RS, Fedotov ES, Golikov AA. Development of methodology for evaluating the brake disc cooling system. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*. 2020;23(1):14–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-1-14-22>
17. Shailendra Pratar V, Siddharth S, Shwetang D, Rishi A. Pneumatic braking mechanism. *engrXiv. Preprints*. <https://doi.org/10.31224/osf.io/5dtz2>
18. Petrescu R.V.V. Mechatronic systems to the braking mechanisms. *Journal of Mechatronics and Robotics*. 2020;4(1):156–190.



<https://doi.org/10.3844/jmrsp.2020.156.190>

19. Polyakov PA, Fedotov ES, Polyakova EA. Design method of modern servo-assisted brake mechanisms. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical*

University. 2017;21(7):39–50. (In Russ.)

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-39-50>

20. Braun OM. Modern understanding of the frictional mechanisms. *Visnik National Academy Nauk Ukraine*. 2012;12:12–18. <https://doi.org/10.15407/visn2012.12.012>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Литвинов Артем Евгеньевич,

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры наземного транспорта
и механики,
Кубанский государственный технологический
университет,
350062, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия;
e-mail: artstyleone@mail.ru

Поляков Павел Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автосервиса и материаловедения,
Кубанский государственный технологический
университет,
350062, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия;
✉ e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Голиков Алексей Александрович,

ассистент кафедры систем управления
и технологических комплексов,
Кубанский государственный технологический
университет,
350062, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия;
e-mail: kubstukup@yandex.ru

Задаянчук Нина Александровна,

преподаватель кафедры информационных
образовательных технологий,
Кубанский государственный университет,
350062, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149,
Россия;
e-mail: nina-nuska@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.03.2021; одобрена после рецензирования 29.04.2021; принята к публикации 30.06.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artem E. Litvinov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Ground Transport
and Mechanics,
Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya St., Krasnodar 350062, Russia;
e-mail: artstyleone@mail.ru

Pavel A. Polyakov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Car Service
and Materials Science,
Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya St., Krasnodar 350062, Russia;
✉ e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Aleksey A. Golikov,

Assistant Professor of the Department of Control Systems
and Technological Complexes,
Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya St., Krasnodar 350062, Russia;
e-mail: kubstukup@yandex.ru

Nina A. Zadayanchuk,

Lecturer of the Department of Information Educational
Technologies,
Kuban State University,
149 Stavropolskaya St., Krasnodar 350062, Russia;
e-mail: nina-nuska@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 12.03.2021; approved after reviewing 29.04.2021; accepted for publication 30.06.2021.



Исследование метода шлифования сапфировых труб с применением двух шлифовальников

© И.В. Савицкий, В.А. Войтенко

Луганский государственный университет им. Владимира Даля, г. Луганск, Луганская Народная Республика

Резюме: Цель – изучить закономерности формирования микрорельефа, распределения и величины остаточной шероховатости внутренней и внешней поверхностей сапфировой трубы во время ее шлифования свободно вращающимися шлифовальными конусами при помощи моделирования. Для изучения абразивной обработки сапфировой трубы использовался метод численного моделирования при помощи программного алгоритма, выполненного в компьютерной среде MATLAB. Предложена математическая модель взаимодействия рабочей поверхности абразивного инструмента и обрабатываемого изделия применительно к двухстороннему шлифованию сапфировых труб свободно вращающимися шлифовальными конусами со связанным абразивом. Данная модель учитывает случайный характер распределения зерен абразива по размерам и форме, хаотичность их размещения в зоне контакта с поверхностью образца, отражая тем самым закономерности их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью при различных комбинациях параметров процесса шлифования. Установлено, что наиболее интенсивный линейный съем материала наблюдается на начальных стадиях шлифования. На внутренней стенке трубы отмечается больший темп удаления объема материала по сравнению с внешней при скорости вращения 2500 об/мин, зернистости абразива 26 мкм, конусности инструментов 1:8 и 1:5 и силе их прижатия к поверхности заготовки на единицу площади около 10 кПа. Выявлено, что остаточная шероховатость после 300 мин обработки имеет неравномерное распределение вдоль оси вращения заготовки с явно выраженным максимумом в ее центральной части, составляющем 64,8 мкм на внешней стенке заготовки и 49,14 мкм – на внутренней. Разработанная математическая модель позволяет исследовать закономерности формирования микрорельефа, распределения и величины остаточной шероховатости для различных условий шлифования, что в дальнейшем дает возможность оптимально подобрать режим обработки и механическую нагрузку на абразивный инструмент. Данная модель также дает возможность определять скорость линейного съема материала и требуемое время шлифования.

Ключевые слова: лейкосапфир, шлифование, шлифовальный конус, связанный абразив, образующая профиля, микрорезание

Для цитирования: Савицкий И.В., Войтенко В.А. Исследование метода шлифования сапфировых труб с применением двух шлифовальников. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 320–331. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-320-331>

Studying a grinding method of sapphire pipes using two grinders

Ivan V. Savitsky, Vladimir A. Voytenko

Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Lugansk People's Republic

Abstract: This paper examines the thermophysics of a drilling process of polymeric composite materials such as carbon-fibre-reinforced plastics (CFRP) and fibreglass by tubular diamond drill bits. Features of the COMSOL Multiphysics engineering software package were used. We employed Fourier heat equations, which express the intensity of heat gain by a mobile source in a moving coordinate system. The research was performed using the proprietary method of modelling spatial thermal action upon drilling polymer composite materials (fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastics) in the COMSOL Multiphysics software environment. A tubular diamond drill bit with a diameter of 10 mm with two slots was chosen as a model cutting tool. Solid plates with a thickness of 5.5 mm made of layered fibrous polymer composite materials (fibreglass, carbon-fibre-reinforced plastic) were used as a preform. As a result of computer calculations, we obtained temperature fields of fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastic during diamond drilling with the tubular tool. When studying the thermal behaviour of fibreglass and carbon-fibre-reinforced plastics, maximum temperature fields were located. The study revealed that the temperature reaches 413.6 K and 448.7 K during CFRP and fibreglass drilling, respectively. It was shown that the distance of heat transfer from the edge of the hole into the preform was 6.42 and 6.40 mm for CFRP and fibreglass, respectively. A method of modelling the thermal effects when cutting polymer composite

materials developed in the COMSOL Multiphysics environment allows complex analytical calculations of temperatures induced by drilling to be simplified. In addition, it helps avoid overheating of a preform during drilling, allows the depth of heat distribution inside the preform from the edge of the formed hole in different polymer composite materials to be assessed. These measures lead to increasing the machining quality of polymer composite materials.

Keywords: leucosapphire, grinding, grinding cone, bonded abrasive, profile generatrix, microcutting

For citation: Savitsky IV, Voytenko VA. Studying a grinding method of sapphire pipes using two grinders. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):320–331. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-320-331>

ВВЕДЕНИЕ

Лейкосапфир является востребованным материалом в различных производственных областях, благодаря его физико-механическими свойствам, таким как высокая химическая инертность, биологическая пассивность, механическая прочность, высокая температура плавления, достаточная прозрачность и устойчивость одновременно к УФ-излучению, а также диэлектрическим особенностям [1].

Монокристаллический сапфир находит свое применение в качестве материала для труб, которые в дальнейшем используются во многих отраслях промышленности и науки. Например, в конструкцию исследовательских реакторов и ядерных энергетических установок входят металлокерамические узлы в виде труб и змеевиков, которые удобно выполнять из лейкосапфира, благодаря вышеперечисленным достоинствам данного материала.

Сапфировые трубы получают методом Степанова путем вытягивания через формообразователь или изготавливают из монокристаллов, выращенных методом Киропулоса. Выбор технологии чаще всего зависит от требуемых размеров изделия. Так, например, методом Степанова получают трубы небольших диаметров до 40 мм. Их минимальный внутренний диаметр может быть достаточно узким и составлять около 800 мкм, что полезно при изготовлении прозрачных капилляров. Из кристаллов, полученных методом Киропулоса, вырезают крупногабаритные трубы диаметром до 250 мм.

Обычный способ Степанова, применяемый для выращивания сапфировых труб с малым внутренним диаметром из расплава, связан с определенными затруднениями, заключающимися в поддержании постоянного

диаметра внутреннего отверстия. Формообразователь, в котором внутренняя полость создается тонким цилиндрическим стержнем, позволяет стабилизировать внутренний диаметр трубки, однако в данном случае важным фактором является вероятностный характер изменения температуры внешней среды. Это влечет за собой отклонения формы изделия от заданных параметров, а в худшем случае – захват кристаллом формообразующего стержня либо обрыв мениска. Более применимым для получения сапфировых труб большого диаметра является способ некапиллярного формообразования (NCS – от англ. Noncapillary Shaping), который был разработан для выращивания высококачественных профилированных кристаллов с большой площадью поперечного сечения [2].

Лейкосапфировые трубки нашли свое применение в PVT-установках (PVT – фото-вольтаика, от англ. photovoltaics), предназначенных для термофизических исследований, и используются в виде прозрачных цилиндров при большом давлении и высокой температуре. Прозрачные цилиндры из лейкосапфира применяются в вакуумной и плазменной электронике, в частности, в газоразрядных лампах, служащих источниками ИК-излучения в оптико-электронных системах [3–5]. Данные системы работают под высокими удельными электрическими нагрузками и требуют интенсивного отвода тепла [6], а их требуемый диапазон излучения лежит, как правило, в пределах длин волн от 0,2 до 6 мкм. Прозрачность лейкосапфира в данном диапазоне достигает 88%. Так как газоразрядные лампы могут эксплуатироваться в заведомо неблагоприятных условиях, надежность и стабильность их характеристик не должны зависеть от окружающей среды, например, если предполагается, что лампа

должна использоваться при повышенных механических или химических воздействиях. Кроме того, токовые выводы должны сохранять герметичность в зоне соединения металла с сапфировой прозрачной стенкой, что, в свою очередь, зависит от качества обработки ее поверхности.

Таким образом, характеристики электронной аппаратуры, в которой присутствуют функциональные элементы, использующие в своей конструкции сапфировые изделия в форме трубок, зависят также от качества исполнения этих изделий, в том числе и от микрорельефа поверхности, полученного в результате шлифования и доводки [7].

Как известно, в традиционных методах обработки тел вращения процесс шлифования сопровождается поперечной подачей абразивного инструмента с приложением определенного механического усилия¹ [8–13], необходимого для достижения требуемой глу-

бины контакта. При этом в кристалле неизбежно возникают напряжения и деформации, что в целом может отрицательно повлиять на качество готового изделия. Подобное воздействие частично ослабляется в случае двухстороннего шлифования при одновременном использовании двух абразивных инструментов, одинаково прижимающихся к заготовке с внутренней и внешней сторон [14]. Стоит отметить, что введение дополнительного вращающего привода усложняет конструкцию оборудования, а также приводит к усилению нежелательных вибраций и необходимости контролировать синхронное вращение двух шлифовальных инструментов [15, 16]. Данная проблема решается с использованием ранее предложенного метода, основанного на применении свободно вращающихся шлифовальных конусов [17], как изображено на рис. 1.

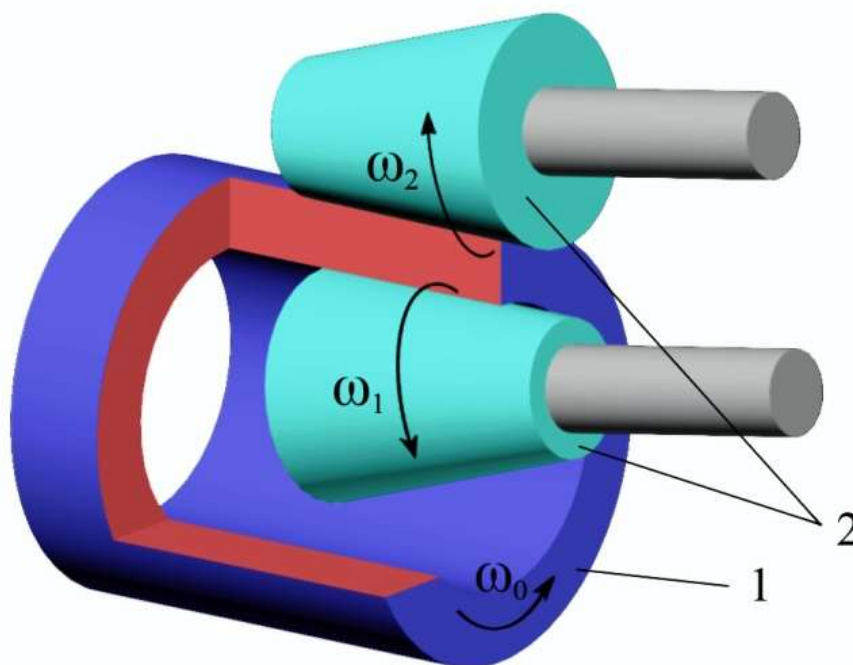


Рис. 1. Схема двухстороннего шлифования сапфировой трубы (1) абразивным инструментом (2) конической формы

Fig. 1. Diagram of twin grinding of a sapphire tube (1) by a cone shape abrasive tool (2)

¹Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Калинин М.А. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении: справочник технолога. М.: Машиностроение, 1976. 288 с.

Сапфировая заготовка приводится во вращение внешним приводом с круговой частотой ω_0 . Вращение абразивных конусов осуществляется за счет сил трения и микро-резания, возникающих в зоне контакта с обрабатываемым изделием. Их средние круговые частоты ω_1 и ω_2 зависят от радиуса их оснований, угла конусности и радиуса заготовки, внутреннего и внешнего, соответственно.

Такой способ шлифования является перспективным с точки зрения качества получаемых изделий, энергоэффективности и простоты оборудования, но требует дополнительных теоретических исследований.

Целью данной работы является изучение закономерностей формирования микрорельефа, распределения и величины остаточной шероховатости внутренней и внешней поверхностей сапфировой трубки при помощи математической модели взаимодействия рабочих поверхностей шлифовальных конусов и обрабатываемого изделия.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХСТОРОННЕГО ШЛИФОВАНИЯ САПФИРОВЫХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КОНУСОВ

Рабочая поверхность шлифовального инструмента имеет зернистую структуру, а поверхность обрабатываемой трубки – начальную шероховатость, которая характеризуется величиной R_z , средней высотой неровностей профиля. Контакт между шлифовальным конусом и заготовкой осуществляется посредством сцепления выступов материала и зерен абразива, находящихся в некоторой ограниченной области с площадью S , на которую действует давление W , обусловленное силой прижатия F инструмента к обрабаты-

ваемой детали [18], как показано на рис. 2.

В случае использования двух шлифовальных конусов, прижимающихся к заготовке с силами F_1 и F_2 , минимум механического напряжения, оказываемого на кристалл, достигается при соблюдении условия: $F_1 = -F_2$. Давление в области прижатия шлифовальных конусов к заготовке можно рассчитать согласно выражениям:

$$W_1 = F_1/S_1; \quad (1)$$

$$W_2 = F_2/S_2, \quad (2)$$

где S_1, S_2 – площади контакта шлифовальных конусов с заготовкой.

Шлифовальный инструмент имеет форму усеченного конуса с радиусами верхнего и нижнего основания R_1 и R_2 , соответственно, и высотой h . Его конусность в общем случае определяется выражением:

$$k = 2(R_2 - R_1)/h. \quad (3)$$

Площадь элементарного участка области контакта шлифовальных конусов с заготовкой при малой конусности может быть приблизительно найдена как произведение элементарной высоты Δh на хорду l , образованную пересечением окружностей поперечного сечения заготовки и шлифовальника:

$$\Delta S \approx l \cdot \Delta h. \quad (4)$$

Задавшись геометрическими параметрами внешнего и внутреннего шлифовального конуса и средним радиусом зерен абразива r_3 , величины хорд для внешней и внутренней сторон трубки будут находиться из соотношений [14]:

$$l_1(x) = 2 \sqrt{R_{\text{шкн}}^2(x) - \left(R_{\text{шкн}}(x) - r_3 \left(1 - \frac{2R_{\text{шкн}}(x) - r_3}{2(R_{\text{шкн}}(x) - r_3 + R_z)} \right) \right)^2}; \quad (5)$$

$$l_2(x) = 2 \sqrt{R_{\text{шкв}}^2(x) - \left(R_{\text{шкв}}(x) - r_3 \left(1 + \frac{2R_{\text{шкв}}(x) - r_3}{2(r_3 + R_z - R_{\text{шкв}}(x) - R_z)} \right) \right)^2}, \quad (6)$$

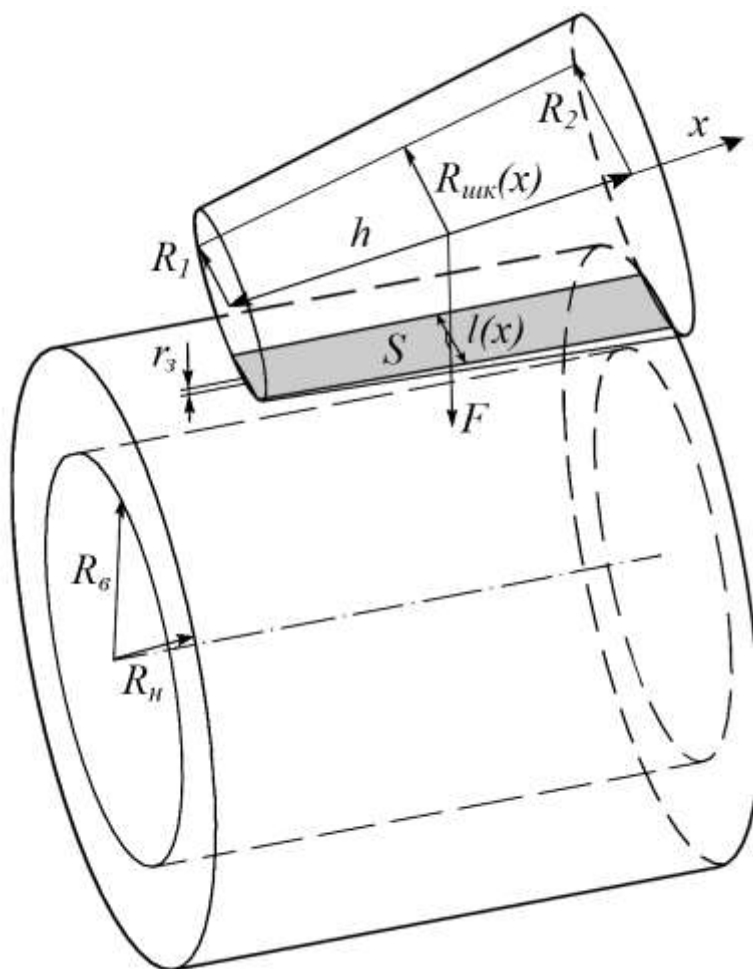


Рис. 2. Схема взаимодействия шлифовального конуса с поверхностью заготовки
Fig. 2. Interaction diagram of the grinding cone and the workpiece surface

где $R_н$ и $R_в$ – наружный и внутренний радиусы заготовки, радиусы сечений шлифовальных конусов $R_{шкн}(x)$, $R_{шкв}(x)$:

$$R_{шкн}(x) = R_{1н} + k_1 x / 2; \quad (7)$$

$$R_{шкв}(x) = R_{1в} + k_2 x / 2, \quad (8)$$

где переменная x является аргументом

функций $R_{шкн}(x)$ и $R_{шкв}(x)$ и определена в диапазоне от 0 до h на координатной оси, отложенной вдоль высоты конусов, $R_{1н}$ и $R_{1в}$ – радиусы одного из оснований наружного и внутреннего конусов, соответствующие точке отсчета $x = 0$.

Таким образом, площадь области контакта абразивного инструмента с поверхностью заготовки для внешней и внутренней сторон:

$$S_1 = 2 \int_0^h \sqrt{R_{шкн}^2(x) - \left(R_{шкн}(x) - r_3 \left(1 - \frac{2R_{шкн}(x) - r_3}{2(R_{шкн}(x) - r_3 + R_н + R_в)} \right) \right)^2} dx; \quad (9)$$

$$S_2 = 2 \int_0^h \sqrt{R_{шкв}^2(x) - \left(R_{шкв}(x) - r_3 \left(1 + \frac{2R_{шкв}(x) - r_3}{2(r_3 + R_в - R_{шкв}(x) - R_н)} \right) \right)^2} dx. \quad (10)$$

Удаляемый объем материала заготовки в единицу времени зависит от линейной скорости движения зерен абразива относительно поверхности образца в зоне контакта, которая на каждом участке вдоль образующей шлифовальных конусов будет различна. Поэтому остаточная шероховатость будет иметь неравномерное распределение.

Если предположить, что в каждый момент времени с каждым выступом обрабатываемой поверхности взаимодействует только одно зерно абразива, можно построить модель, согласно которой объем снимаемого материала с выбранного участка поверхности трубки будет определяться относительной линейной скоростью зерен на данном участке в данный момент времени. При этом скорость вращения шлифовального инструмента будет меняться с учетом сил трения-скольжения или микрорезания, возникающих при взаимодействии индентора (зерна абразива) с микровыступами заготовки. Таким образом, параметры каждого последующего акта внедрения зерен будут зависеть от результатов предыдущего [15–18].

Давление, оказываемое со стороны индентора на микровыступ, зависит от силы, действующей на абразив, и площади контакта с поверхностью микровыступа равной примерно $S_k = \pi R_z^2$. Согласно второму закону Ньютона, сила F_z , оказываемая индентором на поверхность материала, равна произведению массы шлифовального инструмента $m_{ш}$ на испытываемое им ускорение $a_{ш}$, так как работа по снятию материала совершается за счет изменения импульса $P_{ш}$ свободно вращающегося шлифовального конуса вследствие его инерции. Учитывая, что ускорение представляет собой первую производную скорости по времени, а импульс $P_{ш}$ равен произведению массы и скорости, можно записать:

$$F_z = m_{ш} dV_z(t)/dt = dP_{ш}(t)/dt, \quad (11)$$

где масса $m_{ш}$ является постоянной дифференцирования. С учетом связи линейной скорости вращения с радиусом $R_{шк}$ и круговой частотой ω , временную зависимость импуль-

са $P_{ш}$ можно записать в следующем виде:

$$P_{ш}(t) = \omega(t) \cdot M_{шк}, \quad (12)$$

где $M_{шк}$ – момент инерции шлифовального конуса (зависит от его геометрических размеров), а функция $\omega(t)$ будет иметь вид:

$$\omega(t) = \omega_0 \frac{2R_T}{kx(t) + 2R_1}, \quad (13)$$

где ω_0 – круговая частота вращения заготовки; R_T – радиус заготовки; $x(t)$ – ранее описанная величина x , которая в каждый момент времени t принимает случайное значение из промежутка от 0 до h вследствие хаотичности распределения зерен абразива и дисперсии их размеров.

Принимая допущение, что изменение импульса ΔP происходит за достаточно короткий промежуток времени Δt , давление индентора W_z на участок выступа поверхности заготовки можно приблизительно рассчитать, пользуясь выражением:

$$W_z \approx \frac{\Delta P / \Delta t}{S_k}. \quad (14)$$

Микрорезание будет происходить только в том случае, если оказанное давление W_z будет превосходить сдвиговое напряжение упругопластического перехода, составляющее $H_{sp} = 21,8$ ГПа. Глубину внедрения зерен абразива в толщу материала получим из соотношения [19–21]:

$$r = \frac{F_z^{3/4} H_{sp}^{1/8} (1-2\nu)}{1,44 \cdot K_{ic}^{5/6} \sqrt{2\pi^5}}, \quad (15)$$

где F_z – нагрузка со стороны индентора; ν – коэффициент Пуассона; K_{ic} – трещиностойкость сапфира.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ САПФИРОВЫХ ТРУБ В СРЕДЕ MATLAB

Моделирование двухстороннего шлифования сапфировой трубки свободно вращающимися шлифовальными конусами производилось с помощью программного алгорит-



ма, выполненного в компьютерной среде MATLAB. Данная среда позволяет реализовать специальные программные алгоритмы для решения конкретных задач в определенных направлениях на распространенном языке C++. Также она включает в себя обширный список команд и встроенных функций.

Разработанный программный алгоритм моделирования двухстороннего шлифования тонкостенной сапфировой трубы свободно вращающимися шлифовальными конусами состоит из следующих шагов:

- объявление независимых переменных, среди которых задаются такие входные данные, как внешний и внутренний радиусы сапфировой трубки, длина обрабатываемого участка, средняя высота неровностей профиля шероховатости, частота вращения заготовки, время шлифования, радиусы внешнего и внутреннего шлифовального инструмента, их конусность, давление прижатия внешнего шлифовального конуса и зернистость абразива;

- генерация матрицы высот и впадин поверхности для внешней и внутренней сторон заготовки в виде случайных величин в пределах класса исходной шероховатости, количество строк определяется длиной обрабатываемого участка и зернистостью абразива, количество столбцов – длиной окружности соответствующей стороны трубки и средней высотой неровностей профиля шероховатости;

- расчет исходной площади контакта инструмента с внешней и внутренней поверхностями заготовки с использованием выражений (9) и (10) путем численного интегрирования, расчет нагрузки на внутреннюю поверхность трубки из соотношений (1), (2) и условия, где $F_1 = -F_2$, вычисление исходной угловой скорости (13) и начального импульса (12) шлифовальных конусов;

- цикл расчета объема удаляемого материала на каждом участке поверхности заготовки с использованием выражения (15);

- установка контрольных точек времени для фиксации промежуточных результатов моделирования процесса шлифования;

- расчет распределения шероховатости на каждом участке поверхности вдоль обра-

зующей цилиндра по методу скользящей средней;

- вывод результатов моделирования в виде графиков профиля поверхности и распределения шероховатости вдоль образующей цилиндра на каждом участке поверхности.

Вычисление величины снимаемого материала по (15) производится с принятым ранее допущением, что в каждый момент времени происходит только одно взаимодействие зерна абразива с каким-либо выступом поверхности в зоне контакта, изменяя при этом скорость вращения и импульс шлифовального конуса. Характер и результат каждого акта взаимодействия определяется давлением W_z , которое, согласно выражению (14), зависит от изменения импульса ΔP . Время Δt определяется линейной скоростью вращения инструмента относительно заготовки и размерами выступа, заданными на стадии генерации матрицы поверхности обрабатываемого материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработанная модель позволяет исследовать закономерности формирования микрорельефа, распределения и величины получаемой шероховатости и, как следствие, дает возможность оптимально подобрать режим обработки и условия шлифования. Конусность шлифовального инструмента оказывает существенное влияние на скорость снятия материала, а площадь контакта – на форму распределения средней величины остаточной шероховатости вдоль образующей конуса. Размеры зерен абразива являются определяющими для формирования совокупной режущей кромки, которая, в свою очередь, определяет качество шлифования.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены результаты моделирования абразивной обработки сапфировой трубы. Моделирование проводилось при следующих исходных параметрах: частота вращения заготовки $f_{rot} = 2500$ об/мин, размер зерен абразива $r_3 = 26$ мкм с разбросом до ± 3 мкм, начальная средняя величина выступов шероховатости $R_z = 0,1$ мм, наружный и внутренний радиусы заготовки – $R_n = 30$ мм и $R_v = 25$ мм, радиусы больших оснований наружного и

внутреннего шлифовальных инструментов – $R_{1n} = 6,1$ мм и $R_{1v} = 7,5$ мм, их конусность – $k_n = 1:8$ и $k_v = 1:5$ при высоте между основаниями $h = 21$ мм. Начальная нагрузка на наружный инструмент – $W_{0n} = 10$ кПа.

На рис. 2 изображены микрорельефы участков поверхности внешней и внутренней сторон трубки до обработки и после 120 и 300 мин шлифования.

На рис. 3 изображены графики распределения шероховатости вдоль оси вращения заготовки, построенные по методу скользящей средней, взятой от средних величин высоты неровностей профиля на каждом из участков поверхности.

Как видно из рис. 2, наиболее интенсивный линейный съем материала наблюдается в первые минуты шлифования. Далее, по мере сокращения высоты неровностей, требуемое время на снижение шероховатости растет по экспоненциальному закону.

Наибольший темп удаления объема материала наблюдается на внутренней стенке трубы. Это происходит по двум причинам. Во-первых, внутренний шлифовальник имеет большую конусность и, как следствие, большую разность скоростей. Во-вторых, область соприкосновения внутренней стороны трубы с абразивной поверхностью имеет большую площадь.

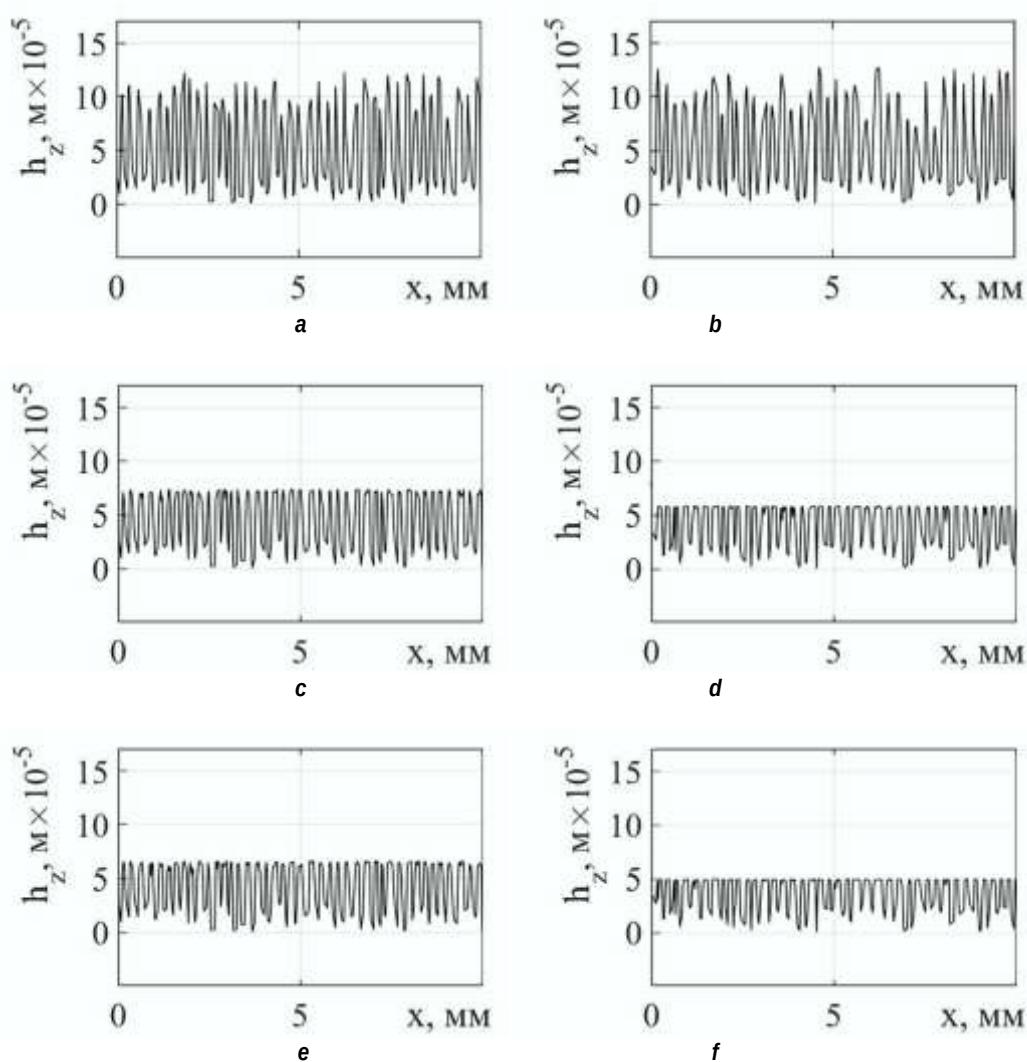


Рис. 3. Профиль шероховатости участка поверхности внешней (а), (с), (е) и внутренней (б), (д), (ф) стороны трубки до обработки (а), (б), после 120 мин (с), (д) и после 300 мин (е), (ф) шлифования

Fig. 3. Roughness profile of the surface area of the outer (a), (c), (e) and inner (b), (d), (f) sides of the tube before processing (a), (b), after 120 min (c), (d) and after 300 min (e), (f) of grinding



Согласно рис. 3, остаточная шероховатость имеет неравномерное распределение вдоль оси вращения заготовки. Это связано с неравномерностью распределения макси-

мально достижимой скорости движения зерен абразива относительно обрабатываемой поверхности, а также с различием площади зоны контакта.

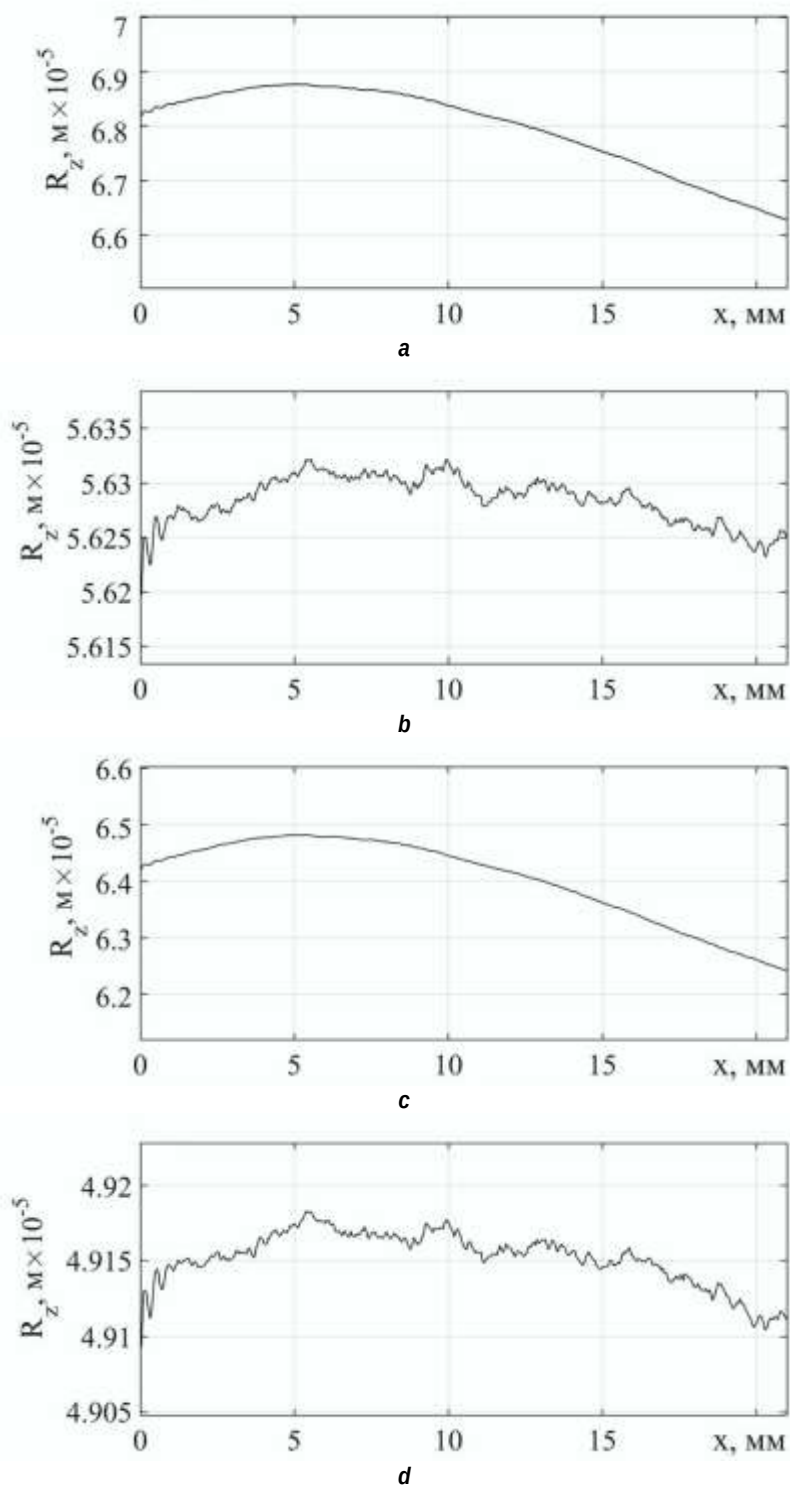


Рис. 4. Распределение шероховатости вдоль оси вращения заготовки на каждом участке поверхности на внешней (а), (с) и внутренней (б), (д) стороне трубки после 120 мин (а), (б) и 300 мин (с), (д) шлифования
Fig. 4. Roughness distribution along the rotation axis of the workpiece at each surface area on the outer (a), (c) and inner (b), (d) sides of the tube after 120 min (a), (b) and 300 min (c), (d) of grinding

На графиках (см. рис. 3) **a** и **c** видно, что средняя величина высоты неровностей профиля R_z имеет пиковое значение 68,8 мкм и 64,8 мкм для 120 и 300 мин шлифования, соответственно, в области, где средняя относительная скорость была минимальна. Графики **b** и **d** демонстрируют меньшее отклонение величины R_z от его среднего значения 56,27 мкм и 49,14 мкм также для 120 и 300 мин шлифования, которое, безусловно, меньше, чем аналогичная величина для внешней стороны заготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двухстороннее шлифование сапфировых труб, с применением свободно вращающихся шлифовальных конусов, является эффективным способом их доводки до требуемых геометрических параметров. Исследование закономерностей двухстороннего шлифования с учетом свойств абразива и обрабатываемого материала может быть реализовано путем проведения численного эксперимента с ис-

пользованием предложенной математической модели, включающей в себя выражения для линейного съема обрабатываемого материала, относительную скорость движения поверхности заготовки и зерен связанного абразива, а также учитывающей их хаотичное распределение. Математическая модель использует коэффициенты, требующие уточнения эмпирическим путем с проведением натурного эксперимента для адекватного расчета микрорезания в процессе взаимодействия абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности. Результаты численного эксперимента позволяют выбрать оптимальную комбинацию параметров режима Двухстороннего шлифования сапфировых труб с применением свободно вращающихся шлифовальных конусов, таких как частота вращения заготовки, конусность инструмента, сила их прижатия поверхности материала, размер зерен абразива для обеспечения заданной скорости съема материала и требуемого качества поверхности.

Список литературы

1. Теплова Т.Б., Самерханова А.С. Тенденция развития применения твердых высокопрочных материалов в микроэлектронике, медицине и ювелирных изделиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 10. С. 339–347.
2. Курлов В.Н., Рассоленко С.Н. Управление формой и качеством кристаллов сапфира при выращивании методом некапиллярного формообразования // Выращивание кристаллических изделий способом Степанова, пластичность и прочность кристаллов: тез. докл. Всерос. совещания (г. Санкт-Петербург, 22–24 октября 2003 г). СПб.: Изд-во Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, 2003. С. 6.
3. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. Импульсные газоразрядные источники ИК-излучения для оптико-электронных систем (обзор) // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333–348.
4. Гавриш С.В., Гайдуков Е.Н., Константинов Б.А. Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей // Светотехника. 1998. № 3. С. 2224–2225.
5. Гавриш С.В. Разрядные источники излучения с сапфировой оболочкой // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 42–51.
6. Гавриш С.В. Влияние условий теплосъема на параметры импульсного газоразрядного источника ИК-излучения // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 86–93.
7. Королев А.В. Выбор оптимальной геометрической формы контактирующих поверхностей деталей машин и приборов. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1972. 134 с.
8. Бочкин О.И., Брук В.А., Никифорова-Денисова С.Н. Механическая обработка полупроводниковых материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Высшая школа», 1983. 112 с.
9. Корсаков В.С. Точность механической обработки. М.: Изд-во «Машгиз», 1961. 379 с.
10. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Изд-во «Машиностроение», 1974. 280 с.
11. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. Л.: Изд-во «Машиностроение», 1984. 103 с.
12. Грабченко А.И., Федорович В.А., Шахбазов Я.А., Русанов В.В. Пути повышения эффективности процесса обработки абразивными шлифовальными кругами // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. Вып. 74. Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. С. 70–83.
13. Matsui S., Tamaki I. Influence of the elastic displacement of grain cutting edges on grinding mechanism // Technology Reports of the Tohoku University. 1976. Vol. 41. Iss. 1. P. 73–88.
14. Савицкий И.В., Войтенко В.А. Увеличение точности обработки сапфировых трубок путем уменьшения механических напряжений // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2020. № 3. С. 61–68.
15. Кудинов В.А., Тодоров Н.Т. Закономерности разви-



тия колебаний и волнистости круга и изделия при врезном шлифовании // Станки и инструмент. 1970. № 2. С. 1–3.

16. Кудинов В.А., Гришин В.М. Динамические частотные характеристики процесса шлифования // Станки и инструмент. 1972. № 1. С. 7–9.

17. Савицкий И.В., Войтенко В.А. Новый метод шлифования цилиндрических поверхностей // Проблемы и перспективы международного трансфера инновационных технологий: сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 24 августа 2020 г.). Стерлитамак: Изд-во АМИ, 2020. С. 56–59.

18. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 112 с.

19. Клунникова Ю.В. Исследование влияния абразивной обработки на процесс образования дефектов в кристаллах сапфира // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. С. 2.

20. Evans A.G., Wilshaw T.R. Quasi-static solid particle damage in brittle solids: observations, analysis and implications // Acta Metallurgica. 1976. Vol. 24. Iss. 10. P. 936–956.

21. Kirchner H.P., Ragosta J.A. Relation of load to radial crack length for spherical indentations in hot-pressed ZnS // Journal of the American Ceramic Society. 1983. Vol. 66. № 4. P. 293–296. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb15717.x>

References

1. Teplova TB, Samerhanova AS. Development trend of using high-strength solid materials in microelectronics, medicine and jewelry. *Gornyj informacionno-analiticheskiy byulleten'* = Mining informational and analytical bulletin. 2006;10:339–347. (In Russ.)

2. Kurlov VN, Rassoleno SN. Controlling sapphire crystal shape and quality when growing by the method of non-capillary shaping. *Vyrashchivanie kristallicheskih izdelij sposobom Stepanova, plastichnost' i prochnost' kristallov: tezisy dokladov Vserossiyskogo soveshchaniya* = Growing crystalline products by Stepanov's method, crystal plasticity and strength: abstracts of the reports of All-Russian Meeting 22–24 October 2003, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Publishing House of the Ioffe Institute SB RAS; 2003, p. 6. (In Russ.)

3. Gavrish SV, Loginov VV, Puchnina SV. Pulsed gas-discharge IR radiation sources for optical-electronic systems (a review). *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* = Advances in Applied Physics. 2018;6(4):333–348. (In Russ.)

4. Gavrish SV, Gaidukov EN, Konstantinov BA. Discharge sources of infrared radiation for special purposes. *Svetotekhnika* = Light & Engineering. 1998;3:2224–2225. (In Russ.)

5. Gavrish SV. Discharge sources of radiation with a sapphire shell. *Prikladnaya fizika* = Applied Physics. 2011;4:42–51. (In Russ.)

6. Gavrish SV. Heat sink conditions influence on pulsed discharge IR radiation source parameters. *Prikladnaya fizika* = Applied Physics. 2018;5:86–93. (In Russ.)

7. Korolev AV. Selection of the optimal geometric shape of the contacting surfaces of machine parts and devices. Saratov: Saratov University Publ.; 1972, 134 p. (In Russ.)

8. Bochkina OI, Brook VA, Nikiforova-Denisova SN. *Mechanical treatment of semiconductors*. Moscow: Vysshaya shkola; 1983, 112 p. (In Russ.)

9. Korsakov BC. *Machining Precision*. Moscow: Mashgiz; 1961, 379 p. (In Russ.)

10. Korchak SN. *Productivity of steel parts grinding*. Moscow: Mashinostroenie; 1974, 280 p. (In Russ.)

11. Lurie GB. *Progressive methods of external cylindrical grinding*. Leningrad: Mashinostroenie; 1984, 103 p. (In Russ.)

12. Grabchenko AI, Fedorovich VA, Shahbazov YaA, Rusanov VV. Ways to improve machining efficiency when treating with abrasive grinding wheels. In: *Rezanie i in-*

strument v tekhnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskij sbornik = Cutting and tools in technological systems: International scientific and technical collection of articles. 74. Har'kov: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute; 2008, p. 70–83.

13. Matsui S, Tamaki I. Influence of the elastic displacement of grain cutting edges on grinding mechanism. *Technology Reports of the Tohoku University*. 1976;41(1):73–88.

14. Savitskiy IV, Voytenko VA. Increasing the accuracy of sapphire tube processing by reducing mechanical stress. *Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroyeni*. 2020;3:61–68. (In Russ.)

15. Kudinov VA, Todorov NT. Development regularities of vibration and wheel and product waviness under plunge-cut grinding. *Stanki i instrument*. 1970;2:1–3. (In Russ.)

16. Kudinov VA, Grishin VM. Dynamic frequency characteristics of grinding. *Stanki i instrument*. 1972;1:7–9. (In Russ.)

17. Savitskiy IV, Voitenko VA. A new grinding method of cylindrical surfaces. *Problemy i perspektivy mezhdu-narodnogo transfera innovatsionnykh tekhnologij: sbornik statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Problems and prospects of the international transfer of innovative technologies: collected articles based on the results of the International scientific and practical conference. 24 August 2020, Voronezh. Sterlita-mak: International Research Agency Publ.; 2020, p. 56–59. (In Russ.)

18. Demkin NB. The actual contact area of solid surfaces. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ.; 1962, 112 p. (In Russ.)

19. Klunnikova YuV. Research of abrasive treatment influence on process of defects formation in sapphire crystals. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2016;2:2. (In Russ.)

20. Evans AG, Wilshaw TR. Quasi-static solid particle damage in brittle solids: observations, analysis and implications. *Acta Metallurgica*. 1976;24(10):936–956.

21. Kirchner HP, Ragosta JA. Relation of load to radial crack length for spherical indentations in hot-pressed ZnS. *Journal of the American Ceramic Society*. 1983;66(4):293–296. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb15717.x>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савицкий Иван Викторович,
аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники,
Луганский государственный университет
им. Владимира Даля,
91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20/А,
Луганская Народная Республика;
✉ e-mail: ivan-savitskiy@mail.ru

Войтенко Владимир Афанасьевич,
доцент, кандидат технических наук,
заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники,
Луганский государственный университет
им. Владимира Даля,
91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20/А,
Луганская Народная Республика;
e-mail: vlvoytenko@gmail.com

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.02.2021; одобрена после рецензирования 23.04.2021; принята к публикации 30.06.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Savitsky,
Postgraduate student of the Department of
Micro- and Nanoelectronics,
Lugansk State University named after Vladimir Dahl,
20/A Molodezhny Block, Lugansk 91034, Lugansk
People's Republic;
✉ e-mail: ivan-savitskiy@mail.ru

Vladimir A. Voytenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics,
Lugansk State University named after Vladimir Dahl,
20/A Molodezhny Block, Lugansk 91034, Lugansk
People's Republic;
e-mail: vlvoytenko@gmail.com

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 03.02.2021; approved after reviewing 23.04.2021; accepted for publication 30.06.2021.



Разработка математической модели маршрута изготовления изделий машиностроения

© И.В. Фокин, А.Н. Смирнов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – создание математической модели, описывающей процесс формирования маршрута изготовления (расцеховки) изделий машиностроения на основе 3D-модели, позволяющей снизить стоимость конечного изделия. Объектом исследования явился маршрут изготовления (расцеховка) изделий машиностроения. Для реализации работы разработанной математической модели использованы 3D-модели, спроектированные в системе Siemens NX, которые далее импортируются в формат *stp и распознаются спроектированным модулем, написанным на языке программирования Python. Определены взаимосвязи производственной среды, оказывающие влияние на формирование маршрута изготовления изделий машиностроения. Разработана схема алгоритма взаимосвязи «конструктивный элемент – технологическая операция – средства технологического оснащения (оборудование-инструмент)». По результатам тестирования сформированной математической модели установлено, что использование нейросетей как инструмента для реализации и автоматизации работы инженера-технолога при разработке маршрута изготовления изделий машиностроения имеет ряд преимуществ перед стандартной схемой работы, это снижение времени на разработку маршрута и снижение себестоимости разработки конечного изделия. К основному ограничению использования на практике разработанной модели можно отнести слишком сложную геометрию некоторых конструктивных элементов, входящих в состав детали, что не позволяет составить алгоритм распознавания их структуры. Использование прототипа нейросети в автоматическом режиме целесообразно для относительно простых деталей (имеющих в своем составе отбортовку, отверстие, фаску, скругление). Но так как количество простых с точки зрения распознавания деталей может достигать 40% среди номенклатуры изготавливаемых деталей, то и уменьшение времени разработки технологического процесса по сравнению с традиционным будет составлять 10–25% от общего времени технологической подготовки.

Ключевые слова: технологический процесс, маршрут изготовления, формализация данных, 3D-модель, нейронные сети

Для цитирования: Фокин И.В., Смирнов А.Н. Разработка математической модели маршрута изготовления изделий машиностроения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 332–341. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-332-341>

A mathematical model for production routing of mechanical engineering products

Igor V. Fokin, Anton N. Smirnov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim was to create a mathematical model describing the development of a production (shop-to-shop) routing of mechanical engineering products based on a 3D model and allowing the cost of the final product to be reduced. The developed mathematical model was simulated based on 3D models designed in the Siemens NX system, which were subsequently imported into the *stp format and recognized by a designed module written in the Python programming language. The factors of the production environment affecting the formation of the production routing of mechanical engineering products were determined. A diagram of the algorithm for the “constructive element - technological operation - means of technological equipment (equipment-tool)” relationship was developed. Based on the results of testing the developed mathematical model, the use of neural networks as a tool for the implementation and automation of the work was found advantageous as compared to the standard scheme of work of a process engineer when developing a production routing of mechanical engineering products. These advantages include a decrease in the time for the development of a routing and the cost of the final product. The developed model has a practical limitation consisting in a rather complex geometry of some structural elements of a unit, which impedes the development of an algorithm for recognizing their structure. The use of a neural network prototype in automatic mode is advisable for relatively simple parts (including a

flange, hole, chamfer and rounding). However, since the number of simple units from the recognition point of view amounts to about 40% among the nomenclature of manufactured units, the reduction in the development time of the technological process in comparison with the conventional approach comprises only 10–25% of the total time of technological preparation.

Keywords: technological process, manufacturing route, data formalization, 3D model, neural networks

For citation: Fokin IV, Smirnov AN. A mathematical model for production routing of mechanical engineering products. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):332–341. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-332-341>

ВВЕДЕНИЕ

Этап конструкторской подготовки производства и непосредственно само производство автоматизированы в достаточной мере. Наибольшее количество возможностей для внедрения цифровых технологий и автоматизации представляется сейчас на этапе технологической подготовки производства, так как, несмотря на огромную базу знаний, выработанную годами, сформированный маршрут изготовления считается одним из наиболее трудноформулируемых задач, стоящих перед технологической подготовкой производства (ТПП) [1].

Для решения этого вопроса пока еще не существует смоделированного математического аппарата, строгих формальных методов, а результат решения в большей мере зависит от творческой интуиции, инженерных знаний и производственного опыта формирующих его специалистов-технологов.

Проектирование технологического процесса изготовления детали можно представить в виде двух самостоятельных этапов:

- 1) анализ исходных данных для проектирования технологических процессов;
- 2) непосредственное проектирование технологического процесса.

На первом этапе предварительно предстоит проанализировать исходную информацию, которая требуется для дальнейшего формирования технологического процесса.

Первоначальными исходными данными для технолога являются рабочая конструкторская документация (КД) детали и технические требования (ТТ) на ее изготовление, регламентирующие параметры точности, параметры шероховатости и остальные предъявляемые к качеству изделия требования; далее необходим сборочный чертеж узла, в котором показана ориентация детали относи-

тельно других, технические условия (ТУ) на сборку; объем годового выпуска изделий. Для формирования технологического процесса изготовления детали изначально требуется проанализировать ее функции и конструкцию, которые она будет выполнять в узле, механизме, машине, оценить технологичность конструкции и проанализировать чертеж. Рабочий чертеж изделия должен иметь в своем составе всю необходимую информацию для точного и исчерпывающего понимания о своей структуре и назначении, а также при последующем изготовлении и контроле заданных параметров. Под технологичностью конструкции детали понимается набор свойств какой-либо конструкции, обеспечивающий ее наиболее экономичное изготовление. Технологичность в обязательном порядке рассматривается с учетом условий конкретного производства, анализируются характерные черты конструкции и требования, предъявляемые к качеству, как исходные данные возможного способа изготовления изделия в данных условиях. Рассматриваются возможные трудности по обеспечению качественных параметров поверхности, а именно: шероховатость, размеры, форма и расположение поверхностей при использовании оборудования, инструментов, приспособлений и метрологических средств. Следующим шагом необходимо обратить внимание на конфигурацию изделия и его размерные соотношения детали, проанализировать, насколько обоснованно были определены параметры точности, определить возможность незначительных корректировок, не оказывающих влияние на качественные характеристики детали, но облегчающих ее последующее изготовление.

Для формирования маршрута изготовления рассматриваются специальные ТТ (тер-



мическая обработка, подгонка массы и т.д.), определяется их выполнение в технологическом процессе и место контроля. Ревизии утверждают в установленном организационном порядке и вносят в рабочие чертежи и ТТ на изготовление изделия. Анализ условий работы детали в узле позволяет определить требования к материалу для изготовления детали и сформировать условия его выбора, предварительно наметить систему мероприятий, направленных на повышение эксплуатационной стойкости детали. Анализ программы (объема) выпуска продукции позволяет определить тип производства, который является основой для выбора заготовки и метода ее изготовления¹ [2–4]. Метод изготовления заготовки определяется исходя из снижения затрат в последующем на готовую деталь для заложенной программы выпуска. Чем ближе форма и размеры заготовки к форме конечного изделия, тем она будет дороже в своем изготовлении, но станет дешевле и проще ее дальнейшая обработка при высоком коэффициенте использования материала. На следующем этапе, после предварительного рассмотрения исходных данных, инженер-технолог переходит к написанию технологического процесса, включающего в себя разработку маршрутной (формирование состава операций и потребного технологического оснащения) и операционной технологии (создание структуры операций и разработка технологических расчетов) обработки деталей.

Основной принцип разработки ТП – выбор необходимых данных из нормативных документов либо формирование на основе опыта инженера-технолога операций, оборудования и материалов, инструмента и исполнителей.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Повышение уровня конструкторско-технологической подготовки производства на всех этапах жизненного цикла изделия. Увеличение показателей кастомизации предприятия за счет формализации базы данных (БД) и базы знаний (БЗ) для повышения конкурентоспособности производимого изделия, а также совершенствования существующих и создания новых технологических процессов изделий машиностроения требуемого качества с минимальными затратами труда, материальных и энергетических ресурсов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В предложенном варианте исходными данными является конструктивный электронный макет (КЭМ) детали с определенным набором конструктивных элементов, сформированный на предыдущем этапе оценки технологических показателей конструкции листовой детали (рис. 1).

Проработка спроектированной конструкции детали на параметры технологичности происходит путем подстановки вариантов технологических процессов ее изготовления.

Процедура выбора технологической операции (ТО) базируется на анализе состава конструктивных элементов, которые, в свою очередь, определяют структуру конструкции детали с последующим сопоставлением с нормированием каждой операции.

При традиционном подходе по технологии создания КЭМ изделия формирование состава конструктивных элементов выполняется на основе выбора типовых элементов, разрабатываемых на данном предприятии, которые хранятся в электронной библиотеке собственных типовых конструктивных элементов для разных конфигураций деталей^{2,3} [5–13].

¹Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019665155. Модуль распознавания конструктивных JeLE-MENTOV машиностроения / И.В. Фокин, А.Н. Смирнов. Правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 14.11.2019; опубл. 20.11.2019.

²ГОСТ 2.051-2013. Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения. Введ. 01.06.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 9 с.

³ГОСТ 2.052-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. 28.02.2006. М.: Стандартинформ, 2007. 11 р.

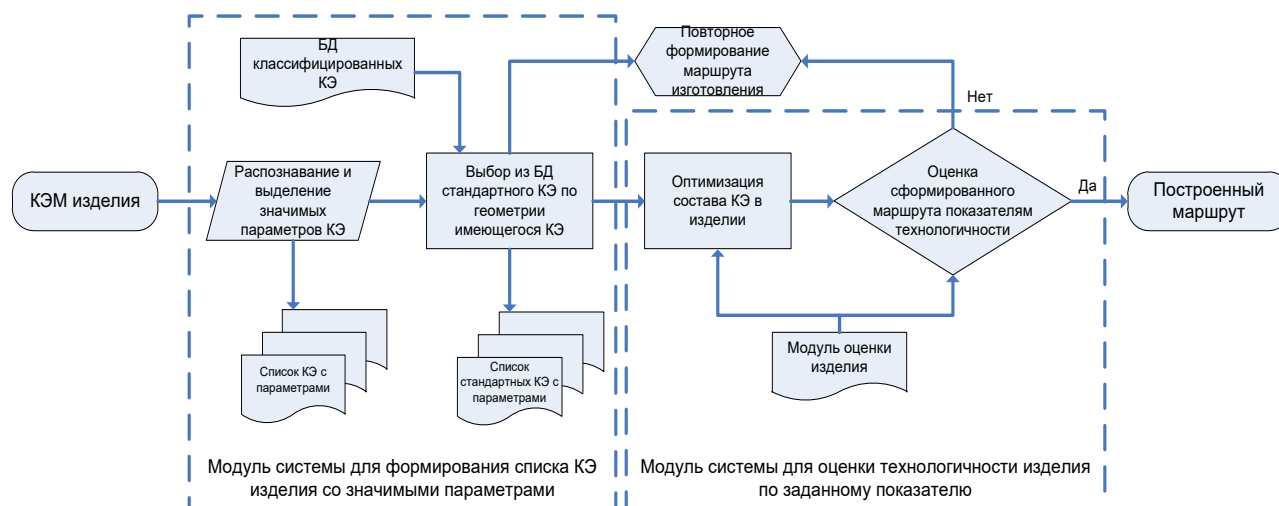


Рис. 1. Последовательность формирования информационной модели формирования маршрута
Fig. 1. Formation sequence of the route making information model

Отработка спроектированного варианта конструкции изделия на показатели технологичности производится способом подбора нескольких вариантов технологических процессов ее изготовления, в состав которой входит выбор используемого оборудования, средств технологического оснащения, инструмента и т.д.

В качестве объекта технологического процесса была выбрана деталь заготовительно-штамповочного производства, так как именно данный вид производства дает возможность сделать детали более легкими при сохранении прочности, помимо этого оцифровать в наиболее полной мере.

Концепцию качественной оценки изделия можно условно разделить на 2 этапа:

- анализ геометрических параметров конструктивных элементов, входящих в набор структурных показателей изделия;
- сравнение возможностей имеющегося набора производственного базиса для изготовления заданных конструктивных элементов и изделий целиком.

Идея анализа изделия строится на предположении, что любое изделие (диафрагмы, стенки, уголки и т.д.) можно формализовать в виде набора конструктивных, связанных определенным образом и обладающих своим набором, характеристик.

Далее для обеспечения возможности однозначного определения изделия через его конструктивные элементы была предложена

структура классификатора возможных конструктивных элементов.

Следует отметить, что перечень конструктивных элементов (КЭ) на самом деле достаточно велик, и здесь приведен типовой перечень только для отбортовки.

Такое представление детали через набор конструктивных элементов достаточно для понимания человеком, но недостаточно для автоматизированного распознавания программным методом, так как само понятие «конструктивный элемент» является эмпирическим.

Электронная модель изделия представлена в виде иерархической структуры, изображенной на рис. 2.

При этом конструктивные элементы однозначно определяются через графовый набор «ребра-поверхности», где ребра 3D-модели выступают в роли вершин графа, а поверхности 3D-модели – в роли ребер графа.

После распознавания конструктивных элементов идет этап составления маршрутной карты технологических операций их получения, а также подбор необходимого оборудования.

Реализация этого этапа возможна несколькими способами. Первый, линейный, подразумевает постановку в соответствие каждому конструктивному элементу операцию его получения и используемое оборудование. Результаты такого соответствия представлены в таблице.

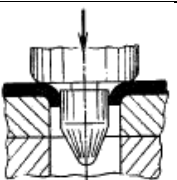
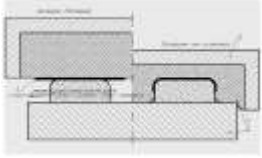
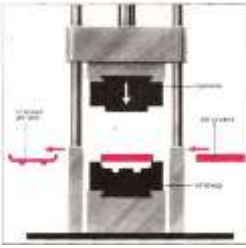


Рис. 2. Электронное представление 3D-модели изделия
Fig. 2. Electronic representation of the product 3D model

Второй способ – это создание рекуррентной нейронной сети в качестве механизма соединения пространства конструктивных элементов с пространством технологических операций. Такой подход позволяет состав-

лять маршрутную карту технологических операций, но делает это не самым оптимальным способом: не учитывает особенности конкретного элемента и их сочетания [14–20].

Таблица отношений типовых элементов технологической подготовки с конструктивными элементами деталей из листового полуфабриката
Correspondence table of typical elements of technological preparation and structural elements of parts made of semi-finished sheet products

Код конструктивных элементов	Наименование конструктивных элементов детали	Технологическая операция	Средство технологического оснащения / инструмент	Оборудование	Схема выполнения операции
01	Отбортовка на плоской поверхности.	2138 отбортовка	инструментальный штамп	пресс гидравлический	
02	Отбортовка на криволинейной поверхности.	2180 штамповка эластичными средами (жидкостью, резиной, полиуретаном)	формблок	пресс гидравлический	
03	Отбортовка глухая на плоской поверхности. Отбортовка глухая на криволинейной поверхности	формовка	свинцово-цинковый штамп	листоштамповочный молот	

Отличие нейронных сетей с прямой связью от сетей RNN (англ. Recurrent neural network) заключается в том, что RNN нейросети могут использовать свою внутреннюю память (состояние) для последовательной обработки входных данных. Это преимущество позволяет им заниматься такими задачами, как несегментированное, связанное распознавание рукописного ввода или распознавание голосовой речи. Другие же нейронные сети имеют все независимые друг от друга входы. Но в RNN все входы связаны друг с другом. Схема такой нейросети представлена на рис. 3.

Так как в нашем случае входными данными

является последовательность конструктивных элементов детали, а на выходе мы ожидаем получить маршрутную карту технологических операций, то есть тоже некую последовательность, то такая модель наиболее хорошо подходит для решения поставленной задачи.

Применение разработанной системы на примере окантовки представлено ниже.

В состав конструктивных элементов окантовки входит 1 отбортовка типа 1 по ГОСТ 17040-80⁴.

На рис. 5 представлены результаты работы модуля распознавания конструктивных элементов.

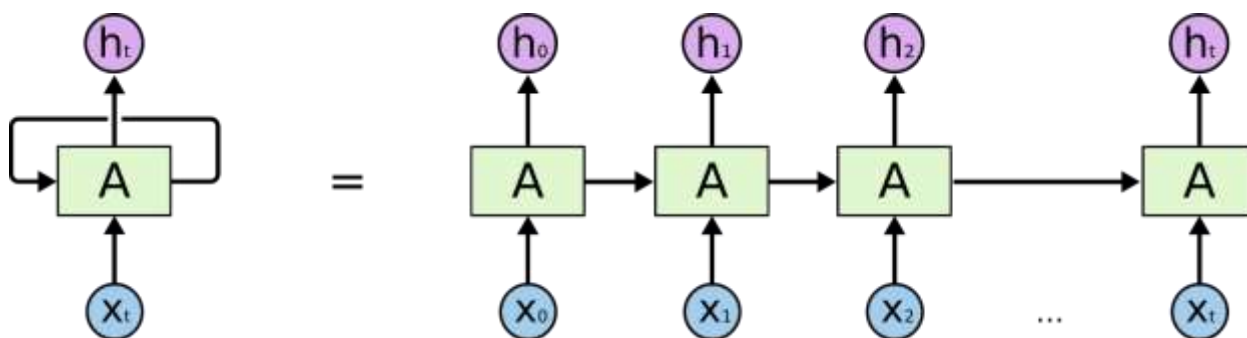


Рис. 3. Структура рекуррентной нейросети
Fig. 3. Structure of the recurrent neural network

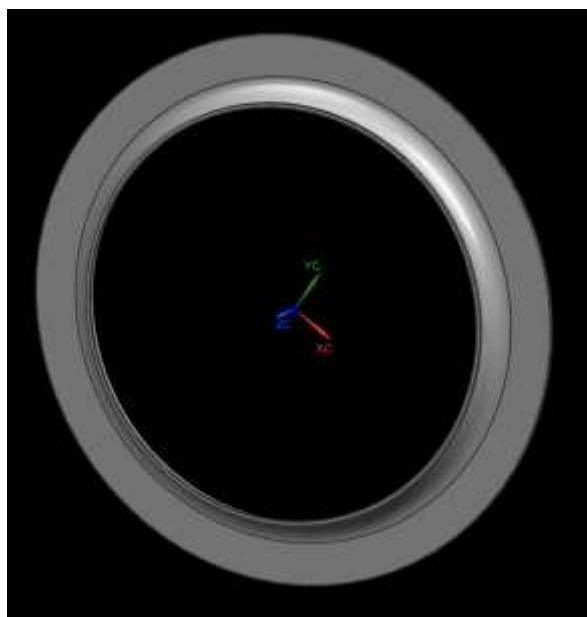


Рис. 4. Деталь типа «Окантовка»
Fig. 4. "Edging" type part

⁴ГОСТ 17040-80. Элементы штампуемых деталей. Конструкция и размеры. Введ. 01.07.1981. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1990.

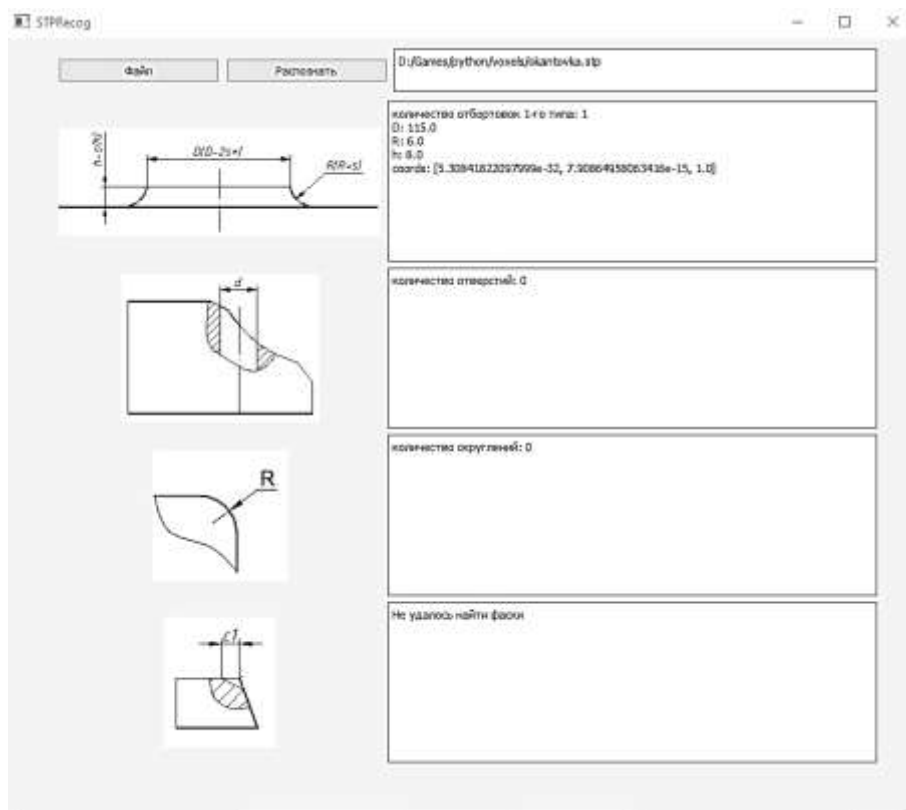


Рис. 5. Распознавание конструктивных элементов окантовки
Fig. 5. Recognition of edging structural elements



Рис. 6. Маршрут изготовления окантовки
Fig. 6. Manufacturing route of edging

Единственный конструктивный элемент был определен корректно.

По конструктивным элементам можно построить маршрут выполнения технологических операций, рис. 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам апробации математической модели можно сделать вывод, что из-за невозможности распознать некоторые конструктивные элементы ее применение в полном автоматизированном режиме целесообразно для относительно простых деталей. В данном случае это окантовки и уголки. Но ввиду того, что количество простых с точки зрения распознавания деталей преобладает среди штампованных в составе узла, то и уменьшение времени разработки технологического процесса по сравнению с традиционным подходом происходит существенное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фактически использование математической модели в полуавтоматическом режиме,

то есть без использования алгоритма распознавания конструктивных элементов, но с применением алгоритма генерации маршрутной карты, может быть целесообразно для сложных деталей. Это обусловлено тем, что затрачиваемое на определение конструктивных элементов время, необходимое на составление операций, подбор средств технологического оснащения и оборудования, составляет около 20% от всей технологиче-

ской подготовки производства, что в денежном эквиваленте будет означать снижение общей стоимости конечного изделия примерно на 7–10%, к примеру при стоимости изделия 96,4 млн \$ (на примере МС-21) экономический эффект составит 7–10 млн \$. Все это позволяет сформировать маршрут изготовления изделий машиностроения требуемого качества с минимальными затратами труда, материальных и энергетических ресурсов.

Список литературы

1. Govorkov A.S. Technique of designing of the product of aviation technics with maintenance of the set criteria of adaptability to manufacture // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies. 2011. Vol. 5. Part. 3. P. 156–161.
2. Govorkov A., Zhilyaev A. The estimation technique of the airframe design for manufacturability // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 124. Iss. 1. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012014>
3. Малыгин А.Н. Модернизация предприятий судостроения и судоремонта на основе внедрения автоматизированных информационных технологий // Juvenis Scientia. 2017. № 7. С. 26–29.
4. Lychagin D.V., Walter A.V., Arkhipova D.A., Lasukov A.A. Systematic classifier of manufacturing processes for medium size shafts // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 125. P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/125/1/012030>
5. Бурмистров Е.Г., Михеев Т.А. Проблемы внедрения автоматизированных систем управления проектами на судостроительных и судоремонтных предприятиях // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2017. Вып. 52. С. 73–79.
6. Rabinskiy L.N., Ripetskiy A.V., Zelenov S.V., Kuznetsova E.L. Analysis and monitoring methods of technological preparation of the additive production // Journal of Industrial Pollution Control. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.icontrolpollution.com/articles/analysis-and-monitoring-methods-of-technological-preparation-of-the-additive-production.php?aid=86082&view=mobile> (12.03.2020).
7. Svetlík J., Baron P., Dobránský J., Kočíško M. Implementation of computer system for support of technological preparation of production for technologies of surface processing // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 613. P. 418–425. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.613.418>
8. Burdo G.B. Improving the technological preparations for manufacturing production // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. Iss. 1. P. 49–56. <https://doi.org/10.3103/S1068798X17010051>
9. Tkachev A.A., Ivanenko Yu.G., Zarubin V.V., Olgarenko I.V. Automation of water distribution management during the reconstruction of main irrigation canals // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 537. Iss. 3. P. 032070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032070>
10. Зяблов О.К., Фунтикова Е.В. Автоматизация технологической подготовки судоремонтного производства // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2014. № 38. С. 49–53.
11. Сахаров В.В., Кузьмин А.А., Чертков А.А. Алгоритм принятия оптимальных решений в судоремонте с применением матрицы Крылова // Вестник государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С.О. Макарова. 2014. № 3. С. 81–89.
12. Зяблов О.К., Кочнев Ю.А. Разработка системы автоматизированного проектирования технологических процессов ремонта судов внутреннего плавания // Речной транспорт (XXI век). 2017. № 2. С. 43–45.
13. Reş M.-D., Bresfelean V.P. Means to enhance the performance of ERP systems' personalized production modules // Emerging Markets Queries in Finance and Business. 2014. Vol. 15. P. 262–270. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00499-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00499-7)
14. Grechishnikov V.A., Khusainov R.M., Akhkiyomov D.R., Yurasov S.Yu., Yurasova O.I. Identifying the primary rigidity axes in the elastic system of a metal-cutting machine // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 8. P. 673–676. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16080104>
15. Khusainov R.M., Sharafutdinov I.F. Methods of assessing the dynamic stability of the cutting process using UNIGRAPHICS NX // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 134. No. 1. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/134/1/012042>
16. Krastyaninov P.M., Khusainov R. Selection of equipment for machining processing of parts using NX and TEAMCENTER programs // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 134. No. 1. P. 012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/134/1/012041>
17. Говорков А.С., Жияев А.С. Практическое применение «Системы анализа технологичности» при проведении технологического контроля изделия авиационной техники // Труды Московского авиационного института. 2014. № 74. P. 21.
18. Subrahmanyam S., Wozny M. An overview of automatic feature recognition techniques for computer-aided



process planning // *Computers in industry*. 1995. Vol. 26. P. 1–21.

19. Akhatov R., Govorkov A., Zhilyaev A. Software solution designing of «The analysis system of workability of industrial product» during the production startup of aeronautical products // *International Journal of Applied Engineering*

Research. 2015. Vol. 10. No. 21. P. 42560–42562.

20. Говорков А.С., Ахатов Р.Х. Анализ технологичности изделия авиационной техники на основе информационного образа изделия // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 6. С. 285–292.

References

1. Govorkov AS. Technique of designing of the product of aviation technics with maintenance of the set criteria of adaptability to manufacture. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies*. 2011;5(3):156–161.

2. Govorkov A, Zhilyaev A. The estimation technique of the airframe design for manufacturability. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;124(1):012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012014>

3. Malygin AN. Modernization of enterprises of shipbuilding and ship repair based on the implementation of automated information technology. *Juvenis Scientia*. 2017;7:26–29.

4. Lychagin DV, Walter AV, Arkhipova DA, Lasukov AA. Systematic classifier of manufacturing processes for medium size shafts. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;125:012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/125/1/012030>

5. Burmistrov EG, Mikheyeva TA. The question of the implementation of automated project management systems in the shipbuilding and ship repair enterprises. *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta = Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2017;52:73–79. (In Russ.)

6. Rabinskiy LN, Ripetskiy AV, Zelenov SV, Kuznetsova EL. Analysis and monitoring methods of technological preparation of the additive production. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017. Available from: <https://www.icontrolpollution.com/articles/analysis-and-monitoring-methods-of-technological-preparation-of-the-additive-production.php?aid=86082&view=mobile> [Accessed 12th March 2020].

7. Svetlík J, Baron P, Dobránský J, Kočíško M. Implementation of computer system for support of technological preparation of production for technologies of surface processing. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;613:418–425. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.613.418>

8. Burdo GB. Improving the technological preparations for manufacturing production. *Russian Engineering Research*. 2017;37(1):49–56. <https://doi.org/10.3103/S1068798X17010051>

9. Tkachev AA, Ivanenko YuG, Zarubin VV, Olgarenko IV. Automation of water distribution management during the reconstruction of main irrigation canals. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;537(3):032070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032070>

10. Zyablov OK, Funtikova EV. Automation of technological preparation of ship repair production. *Vestnik Volzh-*

skoj gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. 2014;38:49–53. (In Russ.)

11. Saharov VV, Kuz'min AA, Chertkov AA. Adopting optimal decisions with application Krylov matrix algorithm in ship-repair companies. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova*. 2014;3:81–89. (In Russ.)

12. Zyablov O, Kochnev Y. The creation of automatic system for projecting technological processes of repairing river ships. *Rechnoj transport (XXI vek) = River transport (XXIst century)*. 2017;2:43–45. (In Russ.)

13. Reş M-D, Bresfelean VP. Means to enhance the performance of ERP systems' personalized production modules. *Emerging Markets Queries in Finance and Business*. 2014;15:262–270.

[https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00499-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00499-7)

14. Grechishnikov VA, Khusainov RM, Akhkiyamov DR, Yurasov SYu, Yurasova OI. Identifying the primary rigidity axes in the elastic system of a metal-cutting machine. *Russian Engineering Research*. 2016;36(8):673–676. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16080104>

15. Khusainov RM, Sharafutdinov IF. Methods of assessing the dynamic stability of the cutting process using UNIGRAPHICS NX. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;134(1):012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/134/1/012042>

16. Krastyaninov PM, Khusainov R. Selection of equipment for machining processing of parts using NX and TEAMCENTER programs. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;134(1):012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/134/1/012041>

17. Govorkov AS, Zhilyaev AS. Practical application of “Manufacturability analysis system” during the control of aircraft elements manufacturability. *Trudy Moskovskogo aviacionnogo instituta*. 2014;74:21. (In Russ.)

18. Subrahmanyam S, Wozny M. An overview of automatic feature recognition techniques for computer-aided process planning. *Computers in industry*. 1995;26:1–21.

19. Akhatov R, Govorkov A, Zhilyaev A. Software solution designing of «The analysis system of workability of industrial product» during the production startup of aeronautical products. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(21):42560–42562.

20. Govorkov AS, Akhatov RH. Analysis of product manufacturability aviation technology-based image information products. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(6):285–292. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фокин Игорь Владимирович,

ассистент кафедры самолетостроения и эксплуатации
авиационной техники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: fokiniv@ex.istu.edu

Смирнов Антон Николаевич,

студент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: horror512@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.04.2021; одобрена
после рецензирования 11.05.2021; принята к публика-
ции 30.06.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Fokin,

Assistant Professor of the Department of Aircraft
Engineering and Operation of Aviation Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: fokiniv@ex.istu.edu

Anton N. Smirnov,

Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: horror512@yandex.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 02.04.2021; approved after
reviewing 11.05.2021; accepted for publication
30.06.2021.



Добавление водорода к топливному газу для повышения энергетических характеристик газотурбинных установок

© Г.Е. Марьин^{***}, Б.М. Осипов^{*}, А.Р. Ахметшин^{****}, М.В. Савина^{*}

^{*}Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

^{**}АО «Татэнерго» филиал «Казанская ТЭЦ-2», г. Казань, Россия

^{***}Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия

Резюме: Цель – расчет технико-экономической эффективности добавления водорода к природному газу для улучшения энергетических характеристик топлива газотурбинных установок при длительной эксплуатации месторождений газа. Для разработки математической модели газотурбинного двигателя General Electric 6FA применялись методы математического моделирования в программе АС ГРЭТ. Показано, что снижение теплотворной способности топлива приводит к увеличению расхода топлива на 11%, происходит увеличение количества CO₂, NO, NO₂ в выхлопных газах газовой турбины. Установлено, что в период отрицательных температур и пиковых режимов работы оборудования мощность турбины будет ограничена пропускной способностью топливной системы (максимальное ее значение составило 5,04 кг/с). Показано, что одним из способов повышения энергетических характеристик является добавление водорода к исходному природному газу. Проведены расчеты энергетической эффективности при различных соотношениях компонентов топлива (водорода и природного газа) при переменных режимах работы установки в диапазоне нагрузок от 75 до 85 МВт. Рассчитан мгновенный расход топливного газа: при мощности 85 МВт он составил 5,04 кг/с (при содержании в подаваемом топливе 4,5% водорода и 95,5% природного газа). Показано, что добавление водорода ввиду его высокой стоимости целесообразно производить только в пиковых режимах для достижения максимальной мощности газотурбинной установки. Предложенный метод добавки водорода в количестве 4,5% к топливному газу позволяет сохранить максимальный расход топлива в количестве 5,04 кг/с для достижения наибольшей мощности 85 МВт. При использовании данного метода нет ограничений по максимальной и пиковой мощностям газотурбинной установки.

Ключевые слова: парогазовая установка, газотурбинная установка, режимы работы электростанции, топливный газ, компонент, процесс сгорания

Для цитирования: Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р., Савина М.В. Добавление водорода к топливному газу для повышения энергетических характеристик газотурбинных установок. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 342–355. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-342-355>

Adding hydrogen to fuel gas to improve energy performance of gas-turbine plants

George E. Marin^{***}, Boris M. Osipov^{*}, Azat R. Akhmetshin^{****}, Maria V. Savina^{*}

^{*}Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

^{**}JSC 'Tatenergo', Branch of Kazan CHP-2, Kazan, Russia

^{***}Roselectromontazh Association, Moscow, Russia

Abstract: The study aims to calculate the technical and economic efficiency of adding hydrogen to natural gas to improve the energy characteristic of the fuel in gas-turbine plants during long-term gas field operations. Mathematical modelling techniques in the CAS CFDPT (computer-aided system for computational fluid dynamics of power turbomachinery) program were used to develop a mathematical model of the General Electric 6FA gas turbine engine. It was shown that a decrease in the calorific value of the fuel leads to an increase in fuel consumption by 11% and the amount of CO₂, NO₂ in the turbine exhaust gas. It was determined that, during the freezing season and peak power rating operations, the turbine power is limited by the fuel system capacity (its maximum value amounted to 5.04 kg/s). It was shown that energy characteristics can be improved by adding hydrogen to the feed natural gas. Energy efficiency was calculated at different fuel components (hydrogen and natural gas) ratios at variable-load operation in the range between 75 and 85 MW. Instant fuel gas flow amounted to 5.04 kg/s (with 4.5% hydrogen and 95.5% natural gas in the feed fuel) at 85 MW. Due to its high cost, the use of hydrogen is only advisable in peak power rating operations to reach the maximum capacity of the gas-turbine plant. The proposed method of adding 4.5% hydrogen to fuel gas allows the maximum fuel consumption to

be maintained at a rate of 5.04 kg/s to reach the topping power of 85 MW. When using this method, there are no limitations on the maximum and peak capacity of the gas-turbine plant.

Keywords: combined cycle plant, gas turbine-plants, power plant operation modes, fuel gas, component, combustion process

For citation: Marin GE, Osipov BM, Akhmetshin AR, Savina MV. Adding hydrogen to fuel gas to improve energy performance of gas-turbine plants. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):342–355. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-342-355>

ВВЕДЕНИЕ

Программа развития традиционной энергетики Российской Федерации предусматривает увеличение количества строительства парогазовых энергоблоков. Согласно «Энергетической стратегии России до 2035 года», приоритетным будет применение газотурбинных технологий¹. Суммарный ввод новых генерирующих мощностей составит 15–18 ГВт. В этот список входят как эффективные газовые турбины большой единичной мощности (160, 400, 500 МВт), так и парогазовые установки на их базе (250–850 МВт) с эффективным КПД до 64%, а также мини-ТЭЦ на базе газовых турбин (5–15 МВт).

Системы сжигания топлива в данных установках позволяют работать газовым турбинам с широким спектром топливных газов, при этом необходимо соблюдать экологическую политику и сохранять минимальные выбросы вредных веществ в атмосферу. Поэтому системы сжигания топлива требуют особого внимания к качеству топлива и его компонентному составу [1].

Для современных газовых турбин характерно совмещение количественно-качественного регулирования во всем диапазоне нагрузок. Первые газотурбинные двигатели начали использоваться в энергетике благодаря авиации, где основная функция системы управления регулировкой расхода топлива сводилась к правильному дозированию топлива для базовых и форсажных режимов работы, так как состав топлива не изменялся в течение полета самолета, а выбросы зависели от совершенства камеры сгорания. Энергетические газотурбинные установки работают в разных диапазонах нагрузки и с изменениями в со-

ставе топлива, поэтому система управления двигателем играет важную роль. Необходима не только качественная топливоподготовка, но и правильное сжигания топлива, которое позволит сократить аварийные режимы работы двигателя и минимизировать выбросы вредных веществ [2–4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время основным видом топливного газа для газотурбинных установок является природный газ различного состава. Но постепенно начинают использоваться и другие газообразные виды топлива и их смеси. Состав топливного газа может изменяться в широких пределах. От газа, состоящего в основном из метана, до газов с тяжелыми углеводородами (бутана и более тяжелых) или газов с большим количеством негорючих газов. Современные газовые турбины ориентированы на сжигание природного газа, состоящего из метана. Однако развитие водородной энергетики, получение газа из биомассы, выделение различных технологических газов ставят задачи адаптации топливной системы газовой турбины под каждый вид топлива в отдельности, а в лучшем случае – к совместному или последовательному сжиганию многокомпонентных топливных газов [5–7].

Топливный газ представляет смесь топливных горючих и инертных газов, охватывающих широкий диапазон теплотворной способности. Качество и компонентный состав топлива, сжигаемого в газовой турбине, влияют не только на качество горения, но и на срок службы горячего тракта турбины [8]. Также состав газа оказывает влияние на ге-

¹Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (28.01.2021).



нерируемую мощность и эффективность газотурбинных установок (ГТУ).

В данном исследовании рассмотрен вопрос изменения энергетических характеристик газовой турбины в зависимости от компонентного состава топлива. Альтернативные виды топлива сильно отличаются по составу по сравнению с природным газом, а значит, влияют на эффективность работы оборудования. Также использование альтернативных видов топлива повлияет на конечную цену продукта – электроэнергию, так как основные затраты на ее производство – это топливные затраты.

Процессы преобразования топлива и его сгорания являются сложными процессами, тем не менее при работе, а также проектировании необходимо определять термодинамические свойства компонентов топлива. При горении образуются продукты сгорания, представляющие многокомпонентную газобразную смесь. Для расчета энтальпии газобразной смеси необходимо определить количественный состав индивидуальных веществ. Топливо может быть однокомпонентным, двухкомпонентным и многокомпонентным. Элементный состав, описывающий содержание химических элементов в топливном газе, необходимо задавать в виде условной формулы. Условная формула исследуемых газов представлена в таблице 2.

При долгосрочной эксплуатации возможно изменение компонентного состава газа, поступающего с определенного месторождения. В связи с этим в данной работе рассмотрен природный газ одного и того же месторождения, но с учетом изменения его компонентного состава. В качестве альтер-

нативного газа рассмотрено применение водорода. С развитием альтернативных топлив очень остро встает вопрос взаимозаменяемости топливных газов с минимальными изменениями в топливной системе. В зависимости от соотношения горючих газов топливный газ имеет разную теплотворную способность. А впоследствии при сжигании отличаются плотность и температура топлива, что также оказывает влияние на срок службы ГТУ.

В данной статье как альтернативное топливо рассмотрен водород. Газы № 1, 2, 3 – это газы одного и того же месторождения с разницей 10 и 15 лет от начала эксплуатации (табл. 1, 2).

Еще одним важным параметром при непрерывной работе газовой турбины является индекс Воббе, вычисляемый для конкретного газа и давления его подачи в камеру сгорания. Если данный индекс двух различных газов совпадает, то работа системы подготовки топлива и настройка системы подачи газа остаются в работе без изменений. Если же отклонение составляет больше 5%, то необходимы остановка оборудования и настройка системы сгорания турбины. Это условие верно при работе турбины на двух видах топлива: основном и резервном. Поэтому перспективны исследования различных составов биогазов. Таким образом, можно к биогазам добавлять водород, тем самым повышая энергетические характеристики топлива. Также технологии газификации позволяют перерабатывать углеводороды в синтез-газы, которые в дальнейшем могут использоваться в энергетических установках.

Таблица 1. Изменение компонентного состава газа с учетом времени

Table 1. Change in gas component composition over the time

№	Наименование показателя	Формула	Газ, %		
			№ 1	№ 2	№ 3
1	Метан	CH_4	95,1603	93,2212	90,75065
2	Этан	C_2H_6	0,2402	2,861	3,861689
3	Пропан	C_3H_8	0,01	0,992	1,348472
4	Изобутан	C_4H_{10}	0	0,336	0,710917
6	Кислород	O_2	0,0471	0,0489	0,048922
7	Азот	N_2	4,27391	2,2059	2,741063
8	Диоксид углерода	CO_2	0,2685	0,335	0,538288

Таблица 2. Аппроксимация характеристик термодинамических свойств топлив различного состава
Table 2. Approximation of characteristics of thermodynamic properties of fuels of different compositions

№	Топливо		С	Н	N	О	Энтальпия, кДж/кг
1	газ	№ 1	5,97	23,538	0,302	0,056	-4489,23
2		№ 2	6,03	22,771	0,239	0,056	-4435,34
3		№ 3	6,08	23,527	0,193	0,056	-4462,82
4	Водород		–	99,216	–	–	-3965,1

Для исследований выбрана газовая турбина GEPG111 6FA мощностью 77 МВт (табл. 3). Газотурбинная установка является одновальным осевым турбоагрегатом, оснащенным 18-ступенчатым компрессором с одним рядом поворотных направляющих лопаток на входе в компрессор, шестью камерами сгорания, а также 3-ступенчатой турбиной с воздушным охлаждением на всех трех сопловых ступенях. Привод генератора осуществляется через понижающий редуктор на переднем конце вала компрессора.

Газовая турбина PG6111FA специально сконструирована для работы в парогазовом цикле. Тепло горячих выхлопных газов от ГТУ используется в котле-утилизаторе для получения перегретого пара.

Для исследования влияния различных составов топлив была создана математическая модель ГТУ (рис. 1, 2) с помощью программного комплекса АС ГРЭТ [9], разработанного коллективом авторов в Казанском государственном энергетическом университете; кроме того, данный комплекс может учитывать изменения нагрузки в энергетической системе [10, 11].

В связи с тем, что чаще всего мощные газовые турбины включают в схему парогазовые установки, рассмотрен режим работы при постоянной нагрузке. Такой режим работы необходим для более экономичной работы. Базовый режим работы подразумевает постоянство температуры на выходе и в камере сгорания газовой турбины [12–15].

Таблица 3. Технические характеристики газотурбинной установки PG6111FA
Table 3. PG6111FA gas turbine unit specifications

Характеристика	Размерность	Значение
Мощность на клеммах генератора	кВт	77211
Атмосферное давление	МПа	0,09934
Температура на входе в компрессор	°C	15
Относительная влажность на входе в компрессор	%	60
Падение давления в системе впуска	Па	833,56
Статическое давление на выпуске при условиях ISO	Па	3432,32
Низшая теплотворная способность топлива	кДж/кг	49194
Температура топлива	°C	30
Давление топлива перед газовым модулем	МПа	2,59 – 3,08
Коэффициент мощности	–	0,85
Количество ступеней в компрессоре	шт.	18
Количество ступеней в турбине	шт.	3
Расход воздуха	м³/с	166
Степень сжатия	–	15,8
Температура воздуха после компрессора	°C	385
Температура уходящих газов	°C	603
Температура газов после камеры сгорания	°C	1325

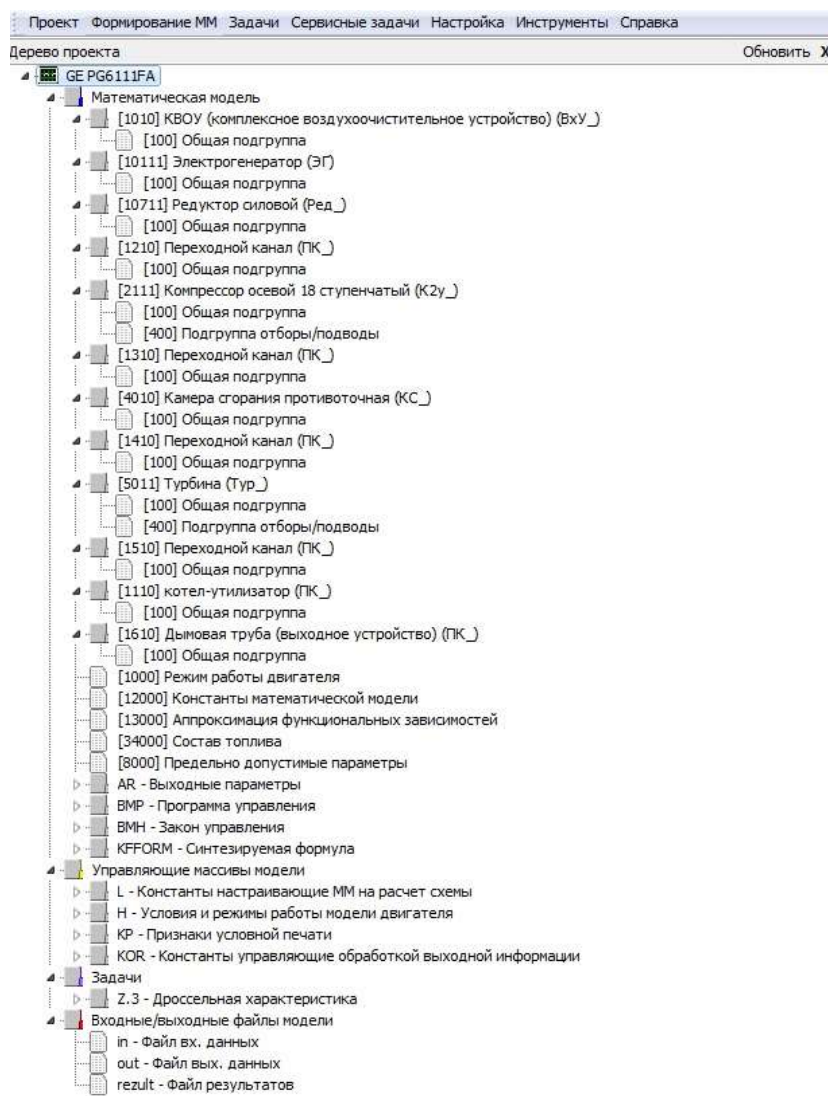


Рис. 1. Меню программного комплекса для расчета газотурбинной установки PG1116FA в АС «ГРЭТ»
Fig. 1. Menu of the software package for calculation of PG1116FA gas turbine unit in the Automated system of gas-dynamic calculations of power turbomachines (AS GDCPT)

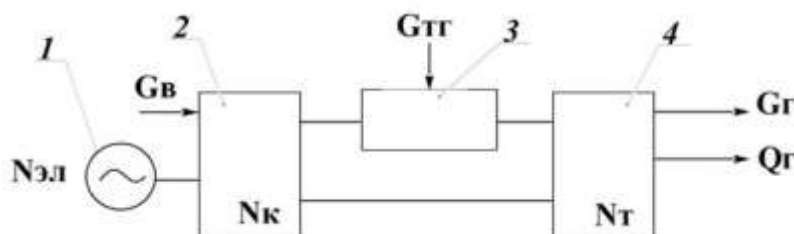


Рис. 2. Блок-схема моделирования газотурбинной установки в АС «ГРЭТ»

1 – электродвигатель; 2 – компрессор; 3 – камера сгорания; 4 – газовая турбина.

$N_{эл}$ – генерируемая мощность, МВт; N_k – мощность, потребляемая на сжатие воздуха, МВт; N_m – мощность, вырабатываемая газовой турбиной, МВт; G_b – воздух, поступающий в компрессор газовой турбины; G_{m2} – топливный газ, поступающий в камеру сгорания; G_g – отработавшие газы газотурбинных установок; Q_g – теплота уходящих газов газотурбинных установок

Fig. 2. Block diagram of the gas turbine unit simulation in AS GDCPT

1 – electric generator; 2 – compressor; 3 – combustion chamber; 4 – gas turbine.

$N_{эл}$ – generated power, MW; N_k – power consumed for air compression, MW; N_m – power generated by the gas turbine, MW; G_b – air entering the gas turbine compressor; G_{m2} – fuel gas entering the combustion chamber; G_g – exhaust gases of gas turbine units; Q_g – heat of gas turbine unit exhaust gases

Исходные данные:

- атмосферное давление на входе в компрессор: $P_{вх} = 0,101325$ МПа;
 - температура воздуха на входе в компрессор: $T_{вх} = 288$ К;
 - относительная влажность на входе в компрессор составляет 60%;
 - температура уходящих газов: $T_{вых} = 874$ К.
- Коэффициент полезного действия можно определить по следующей формуле:

$$\eta_{эфф} = \frac{N_m}{G_m \cdot H_u} \cdot 3600,$$

где $\eta_{эфф}$ – эффективный коэффициент полезного действия, д.е.; N_m – мощность, развиваемая газовой турбиной, МВт; G_m – мгновенный расход топлива, кг/с; H_u – низшая теплотворная способность топлива, кДж/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлено изменение расхода воздуха, потребляемого газовой турбиной в зависимости от мгновенной мощности.

Как очевидно из рис. 3, изменение компонентного состава приводит к увеличению потребляемого воздуха, что дает увеличение затрат на сжатие воздуха.

При изменении состава топлива происходит снижение эффективного КПД турбины (рис. 4).

Снижение эффективного КПД (см. рис. 4) зависит от состава топливного газа, входящих в его состав примесей, но стоит обратить внимание, что снижение КПД при изменении нагрузки газовой турбины незначительно. Это объясняется тем, что турбина работает при изменении нагрузки по закону количественно-качественного регулирования.

Появление в исходных газах примесей и инертных газов приводит к повышению расхода топлива (рис. 5).

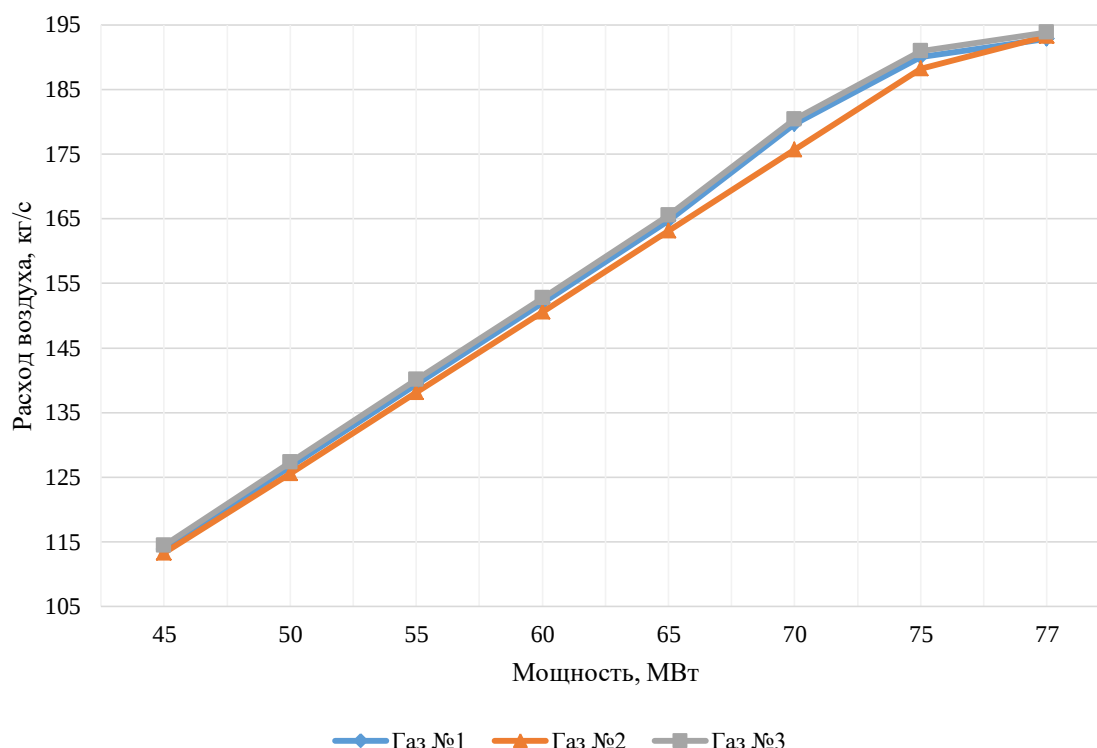


Рис. 3. Изменение расхода воздуха, потребляемого газовой турбиной в зависимости от мгновенной мощности и состава газа

Fig. 3. Variations in gas turbine air consumption depending on the instantaneous power and gas composition

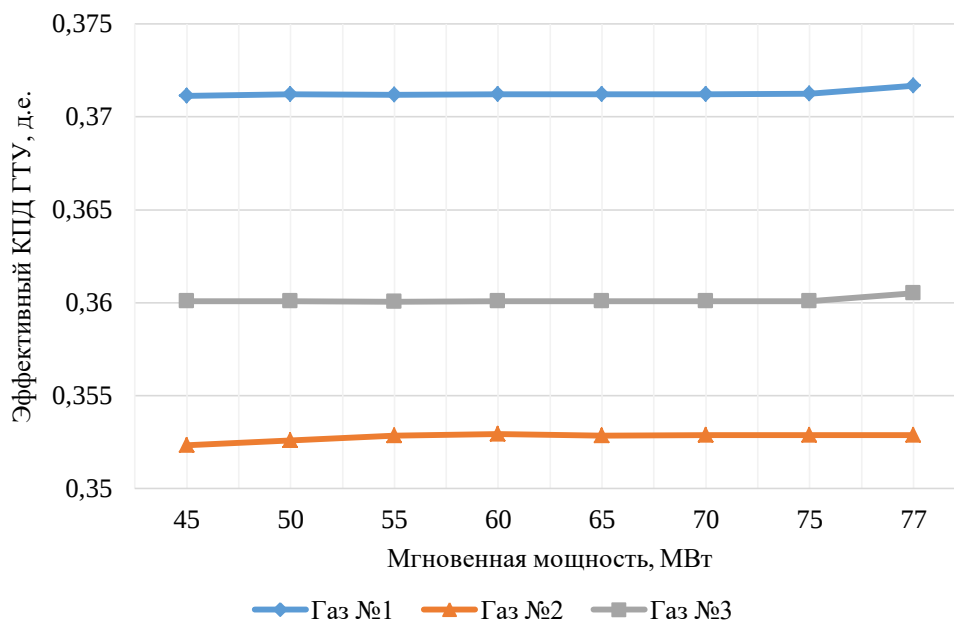


Рис. 4. Изменение эффективного коэффициента полезного действия газовой турбины в зависимости от мгновенной мощности и состава газа

Fig. 4. Variations in the gas turbine efficiency depending on the instantaneous power and gas composition

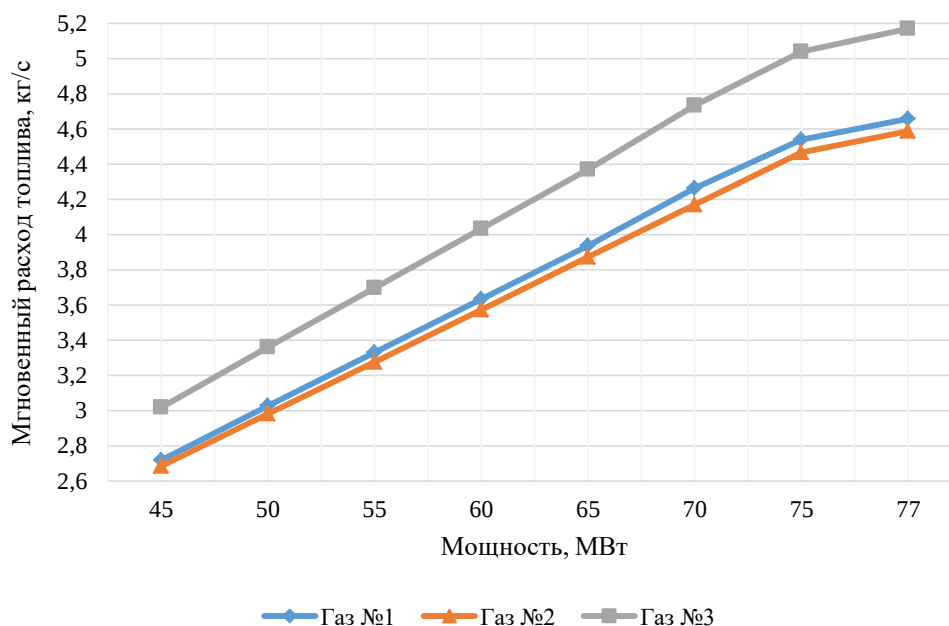


Рис. 5. Изменение мгновенного расхода топлива в зависимости от мгновенной мощности и состава газа

Fig. 5. Variations in the instantaneous fuel consumption depending on the instantaneous power and gas composition

Увеличение количества азота и диоксида углерода в исходном топливе № 3 приводит к существенному увеличению топливного газа, что приводит к дополнительным затратам на топливоподготовку. Как видно из рис. 5, происходит увеличение расхода топлива на 11%.

Одним из самых существенных изменений при смене топлива для газовой турбины является изменение состава выбросов отработавших газов. Увеличение расхода топливного газа приводит к увеличению выбросов (рис. 6).

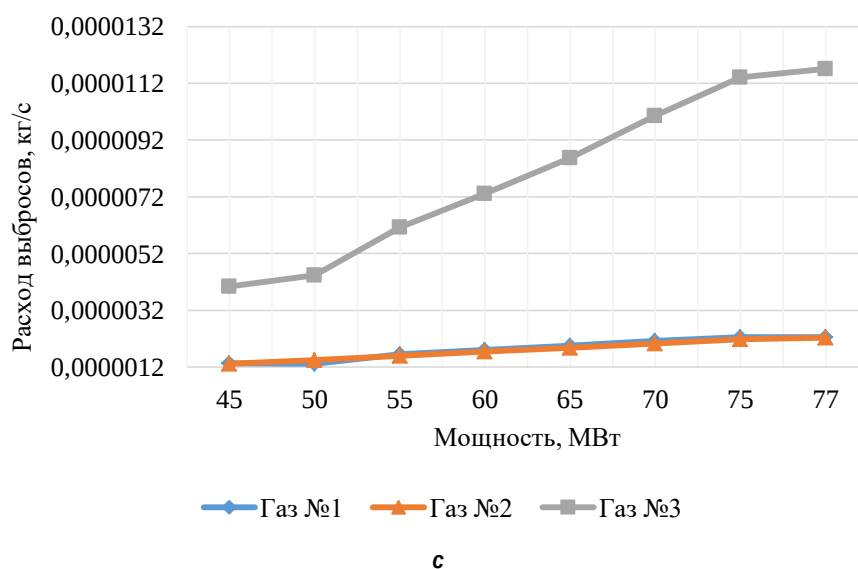
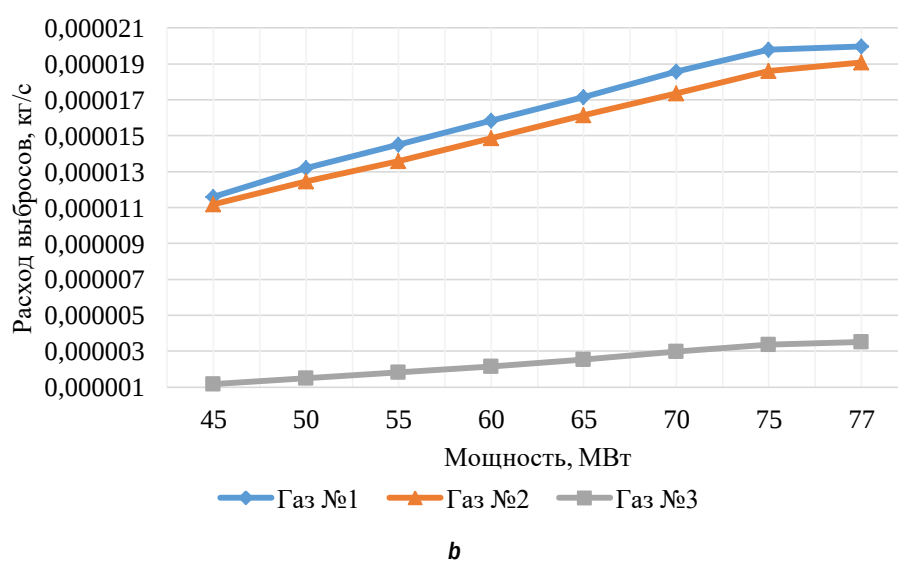
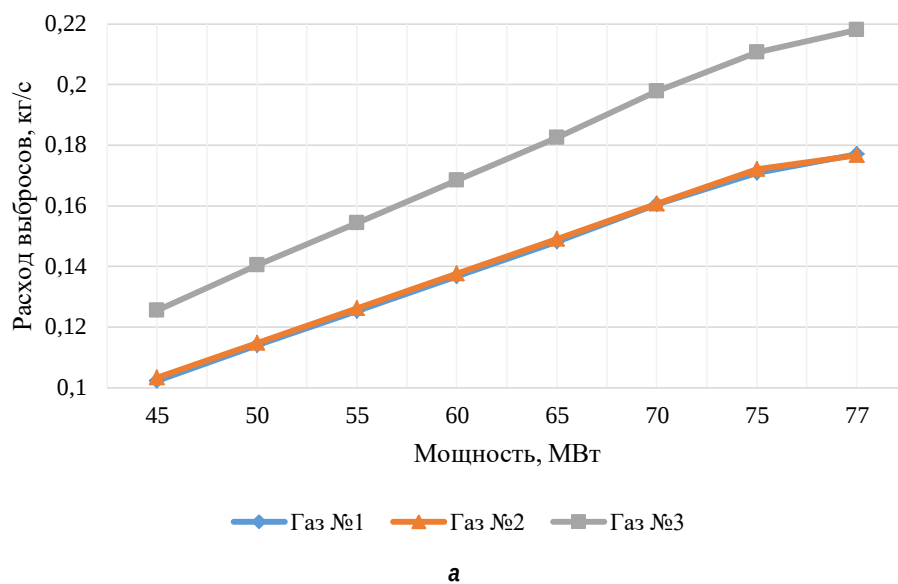


Рис. 6. Выбросы отработавших газов: а – CO₂; б – NO; с – NO₂
 Fig. 6. Exhaust gas emissions: а – CO₂; б – NO; с – NO₂

С увеличением мощности генерирующего оборудования происходит увеличение количества выбросов (см. рис. 6). При достижении мощности 77 МВт происходит увеличение выбросов CO_2 на топливном газе № 3 на 10% по сравнению с топливными газами № 1, 2. При этом происходит увеличение выбросов NO_2 , а количество NO снижается.

При изучении состава выхлопных газов газовой турбины очень важно определить количество кислорода O_2 . В настоящий момент одним из способов повышения мощности парогазовых энергоблоков является установка дожигателя устройства в точной части котла-утилизатора [16]. Для правильного горения необходимо поддерживать содержание кислорода в определенном диапазоне, рис. 7.

При дальнейшем ухудшении энергетических свойств топливного газа будет происходить увеличение расхода топлива. Особенностью работы газовых турбин является несение максимальных нагрузок в период отрицательных температур, что приводит к увеличению мгновенного расхода топлива. Увеличение расхода топлива допустимо в определенных пределах, так как вспомогательное оборудование и подводящие газопроводы рассчитаны на определенные параметры и режимы работы, в связи с этим достижение максимумов генерируемой мощности невозможно. Система газораспределения и газопотребления имеет устоявшуюся схему

снабжения природным газом, и прокладка новых коммуникаций (кроме большой стоимости) требует проблематичных согласований [17–21].

Одним из способов повышения эффективности использования топлива может быть добавка к исходному природному газу альтернативных топлив [22, 23]. В данном случае показано, что произойдет при добавлении водорода с условной формулой: $\text{H}_{99,21619}$.

Водород в качестве топлива для ГТУ является дорогостоящим на данный момент. Поэтому рассмотрен вариант добавления в незначительных количествах водорода к природному газу. В связи с тем, что производительность дожигателя компрессора топливного газа берется с запасом не более 10%, то при достижении максимальной производительности мощность ГТУ будет зависеть от работы дожигателя компрессора (мощность ГТУ будет ограничена).

В результате исследований определен расход подмеса водорода, он составляет 4,5%.

На рис. 8 представлена зависимость мощности газовой турбины от расхода топливного газа с водородом, на рис. 9 – часовой расход топлива при различной мощности ГТУ. На рис. 8 и рис. 9 видно, что при постоянном расходе газа равном 5,04 кг/с добавление водорода приводит к увеличению мощности газовой турбины.

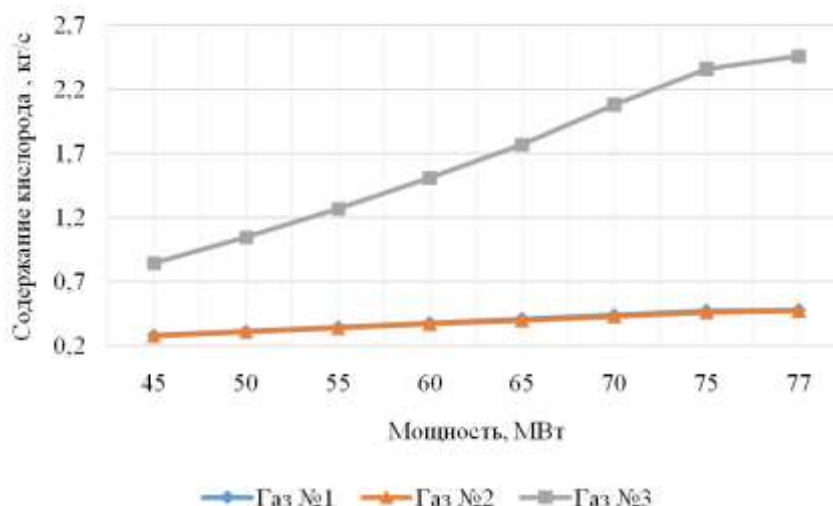


Рис. 7. Содержание кислорода в зависимости от мощности
Fig. 7. Oxygen content as a function of power

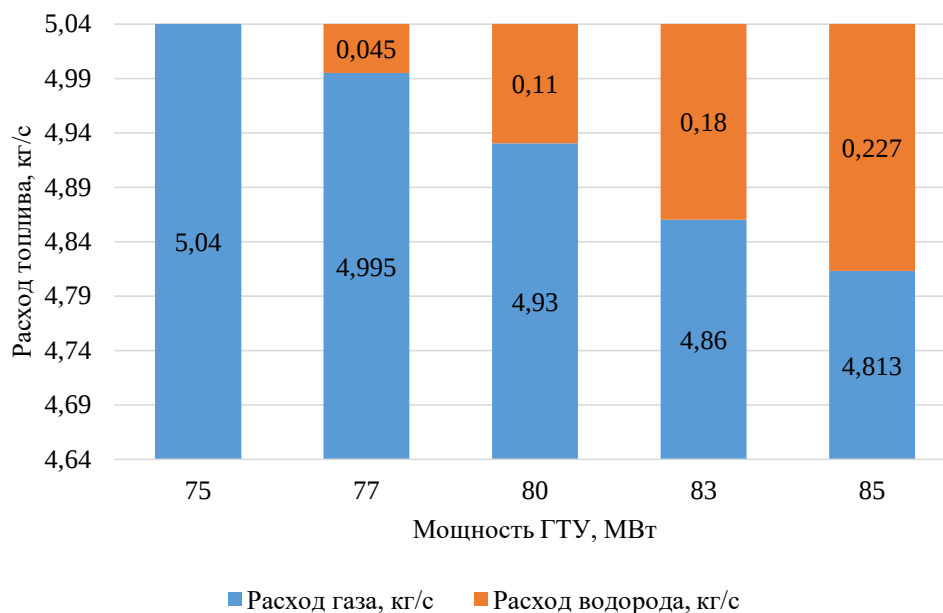


Рис. 8. Зависимость мощности газовой турбины от расхода топлива
 Fig. 8. Gas turbine power versus fuel consumption

Высокие энергетические характеристики водорода позволяют повысить мощность ГТУ. Добавление водорода к топливному газу в количестве 0,227 кг/с позволяет получить необходимую генерируемую мощность газовой турбины 85 МВт, при этом общий расход топливного газа будет снижаться на величину добавки водорода.

При добавлении водорода к топливному

газу происходит снижение часового расхода топлива. Снижение суммарного расхода топлива при мощности 85 МВт составит 13%; так как происходит добавка водорода к природному газу, суммарный расход смеси газа и водорода остается неизменным. Следовательно, изменение режима работы вспомогательного оборудования при переменных режимах ГТУ будет минимально.

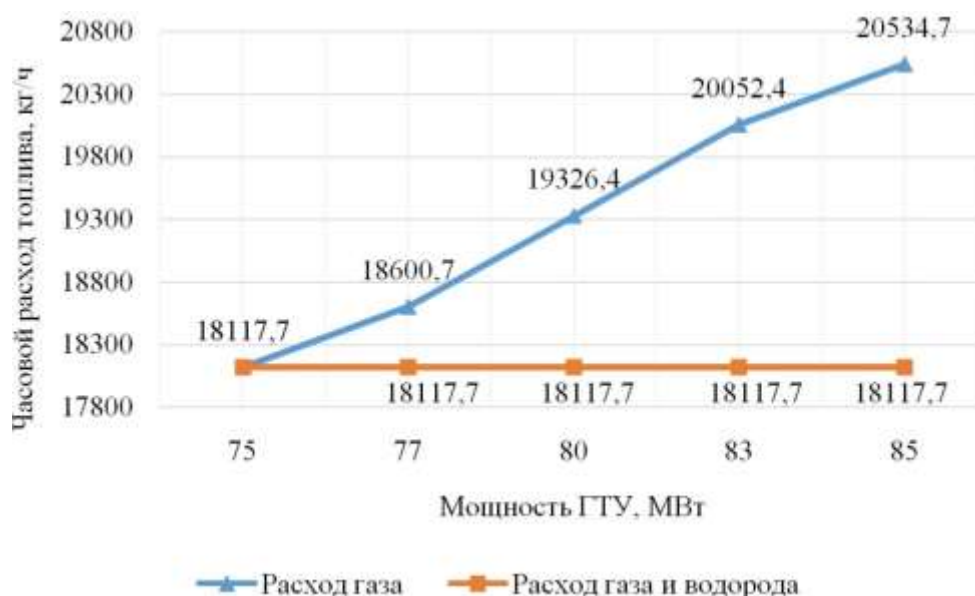


Рис. 9. Зависимость часового расхода топлива мощности при различной мощности газотурбинных установок
 Fig. 9. Dependence of the installation hourly fuel consumption at different power capacity of gas-turbine units



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что при длительной эксплуатации месторождений природного газа происходит изменение компонентного состава. Изменение компонентного состава природного газа оказывает влияние не только на энергетические характеристики газовой турбины, но и на состав продуктов сгорания. Выбрано оптимальное соотношение природного газа 95,5% и водорода 4,5% для получения необходимой генерируемой мощности ГТУ. Состав топливного газа может изменяться в широких пределах: от газа, состоящего в основном из

метана, до газов с тяжелыми углеводородами. Одним из способов повышения эффективности использования топлива может быть добавка к исходному природному газу альтернативных топлив. В данном исследовании рассмотрено добавление водорода к топливному газу – как результат, кроме повышения генерируемой мощности и уменьшения расхода топлива, произойдет уменьшение выбросов. Мы предполагаем, что снижение расхода природного газа приведет к снижению выбросов CO_2 , NO , NO_2 в уходящих газах газотурбинной установки.

Список литературы

1. Марьин Г.Е., Осипов Б.М. Критерии выбора составов топлив при их сжигании в газотурбинных установках с незначительными переделками топливной системы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 356–365. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-356-365>
2. Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Зунино П., Менделеев Д.И. Влияние состава топлива на энергетические параметры газотурбинной установки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 5. С. 41–51. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-41-51>
3. De Vries H., Mokhov A.V., Levinsky H.B. The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end-use equipment: Interchangeability analysis for domestic appliances // Applied Energy. 2017. Vol. 208. P. 1007–1019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.049>
4. Cho H.M., He Bang-Quan. Combustion and emission characteristics of a lean burn natural gas engine // International Journal of Automotive Technology. 2008. Vol. 9. No. 4. P. 415–422. <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0050-5>
5. Lokini P., Roshan D.K., Kushari A. Influence of swirl and primary zone airflow rate on the emissions and performance of a liquid-fueled gas turbine combustor // Journal of Energy Resources Technology. 2019. Vol. 141. Iss. 6. P. 062009. <https://doi.org/10.1115/1.4042410>
6. Marin G.E., Mendeleev D.I., Akhmetshin A.R. Analysis of changes in the thermophysical parameters of the gas turbine unit working fluid depending on the fuel gas composition // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) (Vladivostok, 1–4 October 2019). Vladivostok: IEEE, 2019. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934021>
7. Alcaráz-Calderon A.M., González-Díaz M.O., Mendez Á., González-Santaló J.M., González-Díaz A. Natural gas combined cycle with exhaust gas recirculation and CO_2 capture at part-load operation // Journal of the Energy Institute. 2019. Vol. 92. Iss. 2. P. 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.007>
8. Swamy M., Singh K., Pavan A.H.V., Harison M.C.A., Jayaraman G. Failure investigation of frame 6FA gas turbine compressor blades // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2016. Vol. 69. P. 647–651. <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0775-6>
9. Титов А.В., Осипов Б.М. Инструментальная среда для исследования газотурбинных установок на математических моделях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. № 4. С. 17–21.
10. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Халтурин В.А. Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях на основе анализа их фактических нагрузок // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 5. С. 68–73.
11. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Халтурин В.А. Актуализация расчетных электрических нагрузок с последующим практическим применением на примере Республики Татарстан // Промышленная энергетика. 2021. № 2. С. 32–40. <https://doi.org/10.34831/EP.2021.15.61.005>
12. Ермолаев Д.В., Тимофеева С.С. Влияние моделей структуры асфальтенов высоковязкого углеводородного сырья на энергетические характеристики получаемого синтез-газа // Труды Академэнерго. 2019. № 3. С. 122–134. <https://doi.org/10.34129/2070-4755-2019-56-3-122-134>
13. Бачев Н.Л., Шилова А.А., Матюнин О.О., Бульбо-вич Р.В. Организация низкотемпературного бедного горения утилизируемого газа // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 3. С. 56–68. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4018968>
14. Lukai Zheng, Cronly J., Ubogu E., Ahmed I., Yang Zhang, Khandelwal B. Experimental investigation on alternative fuel combustion performance using a gas turbine combustor // Applied Energy. 2019. Vol. 238. P. 1530–1542. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.175>
15. Lukai Zheng, Chenxing Ling, Ubogu E.A., Cronly J., Ahmed I., Yang Zhang, et al. Effects of alternative fuel properties on particulate produced in a gas turbine com-

bustor // *Energy Fuels*. 2018. Vol. 32. No. 9. P. 9883–9897. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01442>
 16. Esclapez L., Ma P.C., Mayhew E., Rui Xu, Stouffer S., Tonghun Lee, et al. Fuel effects on lean blow-out in a realistic gas turbine combustor // *Combustion and Flame*. 2017. Vol. 181. P. 82–99. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.035>
 17. Цанев С.В., Буров В.Д., Торжков В.Е. Дожигание топлива в тепловой схеме конденсационных парогазовых установок с котлами-утилизаторами одного давления. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 48 с.
 18. Kayfeci M., Keçebaş A., Bayat M. Hydrogen Production // *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*. Academic Press, 2019. P. 45–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>
 19. Dodds P.E., Staffell I., Hawkes A.D., Li Francis, Grünwald P., McDowall W., et al. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: a review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. Iss. 5. P. 2065–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.059>
 20. Jinlong Liu, Dumitrescu C.E. Numerical investigation

of methane number and Wobbe index effects in LeanBurn natural gas spark-ignition combustion // *Energy Fuels*. 2019. Vol. 33. No. 5. P. 4564–4574. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04463>
 21. Shaker M., Sundfor E., Farine G., Slater C., Farine P.A., Briand D. Design and optimization of a low power and fast response viscometer used for determination of the natural gas Wobbe index // *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol. 19. No. 23. P. 10999–11006. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2928479>
 22. Roy P.S., Ryu Ch., Chan Seung Park. Predicting Wobbe index and methane number of a renewable natural gas by the measurement of simple physical properties // *Fuel*. 2018. Vol. 224. P. 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.074>
 23. Islamova S.I., Timofeeva S.S., Khamatgalimov A.R., Ermolaev D.V. Kinetic analysis of the thermal decomposition of lowland and high-moor peats // *Solid Fuel Chemistry*. 2020. Vol. 54. P. 154–162. <https://doi.org/10.3103/S0361521920030040>

References

1. Marin GE, Osipov BM. Choice criteria in the composition of fuel applied in gas turbine installations with minor fuel system modifications. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):356–365. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-356-365>
 2. Marin GE, Osipov BM, Zunino P, Mendelev DI. Influence of fuel composition on energy parameters of gas turbine plant. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Power engineering: Research, Equipment, Technology*. 2020;22(5):41–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-41-51>
 3. De Vries H, Mokhov AV, Levinsky HB. The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end-use equipment: Interchangeability analysis for domestic appliances. *Applied Energy*. 2017;208:1007–1019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.049>
 4. Cho HM, He Bang-Quan. Combustion and emission characteristics of a lean burn natural gas engine. *International Journal of Automotive Technology*. 2008;9(4):415–422. <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0050-5>
 5. Lokini P, Roshan DK, Kushari A. 5. Lokini P, Roshan DK, Kushari A. Influence of swirl and primary zone airflow rate on the emissions and performance of a liquid-fueled gas turbine combustor. *Journal of Energy Resources Technology*. 2019;141(6):062009. <https://doi.org/10.1115/1.4042410>
 6. Marin GE, Mendelev DI, Akhmetshin AR. Analysis of changes in the thermophysical parameters of the gas turbine unit working fluid depending on the fuel gas composition. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 1–4 October 2019, Vladivostok. Vladivostok: IEEE; 2019, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934021>
 7. Alcaráz-Calderon AM, González-Díaz MO, Mendez Á,

González-Santaló JM, González-Díaz A. Natural gas combined cycle with exhaust gas recirculation and CO₂ capture at part-load operation. *Journal of the Energy Institute*. 2019;92(2):370–381. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.007>
 8. Swamy M, Singh K, Pavan AHV, Harison MCA, Jayaraman G. Failure investigation of frame 6FA gas turbine compressor blades. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016. Vol. 69. P. 647–651. <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0775-6>
 9. Titov AV, Osipov BM. Instrumental medium for gas turbine research on mathematical models. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;4:17–21. (In Russ.)
 10. Soluyanov Yul, Fedotov AI, Akhmetshin AR, Khalturin VA. Energy-saving solutions in distribution electric networks based on the analysis of their actual loads. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2020;5(62):68–73. (In Russ.)
 11. Soluyanov Yul, Fedotov AI, Akhmetshin AR, Khalturin VA. Actualization of calculated electrical loads with subsequent practical application on the example of the Republic of Tatarstan. *Promyshlennaya energetika*. 2021;2:32–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.34831/EP.2021.15.61.005>
 12. Ermolaev DV, Timofeeva SS. Influence of the structure models of asphaltene of high-viscous hydrocarbon feedstocks on the thermal properties of produced syngas. *Trudy Akademenergo*. 2019;3:122–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.34129/2070-4755-2019-56-3-122-134>
 13. Bachev NL, Shilova AA, Matyunin OO, Bulbovich RV. Organization of low-temperature poor combustion of recycled gas. *Problemy regional'noi energetiki = Problems of regional energy*. 2020;3:56–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.4018968>
 14. Lukai Zheng, Cronly J, Ubogu E, Ahmed I, Yang



Zhang, Khandelwal B. Experimental investigation on alternative fuel combustion performance using a gas turbine combustor. *Applied Energy*. 2019;238:1530–1542. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.175>

15. Lukai Zheng, Chenxing Ling, Ubogu EA, Cronly J, Ahmed I, Yang Zhang, et al. Effects of alternative fuel properties on particulate produced in a gas turbine combustor. *Energy Fuels*. 2018;32(9):9883–9897. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01442>

16. Esclapez L, Ma PC, Mayhew E, Rui Xu, Stouffer S, Tonghun Lee, et al. Fuel effects on lean blow-out in a realistic gas turbine combustor. *Combustion and Flame*. 2017;181:82–99. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.035>

17. Tsanev SV, Burov VD, Torzhkov VE. *Fuel afterburning in the thermal circuit of condensing combined cycle plants with waste-heat boilers of the same pressure*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2004, 48 p. (In Russ.)

18. Kayfeci M, Keçebaş A, Bayat M. Hydrogen production. In: *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*. Academic Press; 2019, p. 45–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>

19. Dodds PE, Staffell I, Hawkes AD, Li Francis, Grünwald P, McDowall W, et al. Hydrogen and fuel cell tech-

nologies for heating: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(5):2065–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.059>

20. Jinlong Liu, Dumitrescu CE. Numerical investigation of methane number and Wobbe index effects in LeanBurn natural gas spark-ignition combustion. *Energy Fuels*. 2019;33(5):4564–4574. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04463>

21. Shaker M, Sundfor E, Farine G, Slater C, Farine PA, Briand D. Design and optimization of a low power and fast response viscometer used for determination of the natural gas Wobbe index. *IEEE Sensors Journal*. 2019;19(23):10999–11006. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2928479>

22. Roy PS, Ryu Ch, Chan Seung Park. Predicting Wobbe index and methane number of a renewable natural gas by the measurement of simple physical properties. *Fuel*. 2018;224:121–127. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.074>

23. Islamova SI, Timofeeva SS, Khamatgalimov AR, Ermolaev DV. Kinetic analysis of the thermal decomposition of lowland and high-moor peats. *Solid Fuel Chemistry*. 2020;54:154–162. <https://doi.org/10.3103/S0361521920030040>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Марьин Георгий Евгеньевич,
старший машинист энергоблоков
цеха парогазовых установок,
АО «Татэнерго», филиал «Казанская ТЭЦ-2»,
420021, г. Казань, ул. Салимжанова, 1, Россия;
старший преподаватель кафедры энергетического
машиностроения,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
✉ e-mail: george64199@mail.ru

Осипов Борис Михайлович,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры энергетического
машиностроения,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: obm0099@ya.ru

Ахметшин Азат Ринатович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
энергетического машиностроения,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
ведущий специалист Ассоциации
«Росэлектромонтаж»,
111250, г. Москва, пр. Завода «Серп и Молот»,
6/1/615, Россия;
e-mail: dr.akhmetshin@ieee.org

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

George E. Marin,
Senior Control Room Operator of the Combined
Cycle Plant of JSC 'Tatenergo', Branch of Kazan CHP-2,
1 Salimzhanov St., Kazan 420021, Russia;
Senior Lecturer of the Department
of Power Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
✉ e-mail: george64199@mail.ru

Boris M. Osipov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Power Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: obm0099@ya.ru

Azat R. Akhmetshin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department
of Power Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: dr.akhmetshin@ieee.org
Chief Specialist of the Roselectromontazh Association,
6/1/615, Zavoda Serp I Molot proezd, Moscow 111250,
Russia;
e-mail: dr.akhmetshin@ieee.org

Савина Мария Валерьевна,

кандидат технических наук,
доцент кафедры энергетического
машиностроения,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: pmv_83@mail.ru

Maria V. Savina,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Power
Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: e-mail: pmv_83@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку 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 conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.03.2021; одобрена
после рецензирования 11.05.2021; принята к публика-
ции 30.06.2021.

Information about the article

The article was submitted 11.03.2021; approved after
reviewing 11.05.2021; accepted for publication
30.06.2021.



Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России

© В.И. Пантелеев*, И.С. Кузьмин**, А.А. Завалов***,
А.В. Тихонов***, Е.В. Умецкая*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

**ООО ГК «Рутас», г. Красноярск, Россия

***ООО «НПП «Рутас», г. Красноярск, Россия

Резюме: Цель – изучение влияния коэффициента загрузки преобразователей частоты и тиристорных преобразователей на качество электрической энергии с разработкой рекомендаций по снижению влияния высших гармоник и коммутационных перенапряжений на характеристики электроэнергии. В ходе исследования использовался инструментальный метод измерения высших гармоник с помощью прибора комплексного контроля электрических параметров ПКК57 и цифрового осциллографа типа Tektronix TDS 2024 В. Импульсные коммутационные перенапряжения фиксировались с применением активно-резистивного делителя типа ДНЕК-10 и вышеуказанного осциллографа, при исследовании полученных данных использовались программы по обработке статистических данных Logiplot 6.4 и методы математической статистики. Установлен нижний пороговый уровень величины коэффициента загрузки преобразователей частоты и тиристорных преобразователей равный 0,8, при котором значения искажения синусоидальности кривой напряжения соответствуют государственному стандарту Российской Федерации по качеству электрической энергии. Определена степень подавления высших гармоник с 5-й по 17-ю силовыми трансформаторами мощностью от 250 кВ·А до 6300 кВ·А, находящаяся в диапазоне от 95 до 45%. Обосновано использование системы «трансформатор–преобразователь–электроприемник» применительно к системам электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий. Показано, что электродвигатели мощностью до 2500 кВт включительно требуют защиты от коммутационных перенапряжений. Доказана высокая эффективность универсального RC-гасителя на базе RC-цепей, подключенного к зажимам электродвигателя, как средства защиты электродвигателей от коммутационных перенапряжений. Таким образом, для повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России следует обеспечить эксплуатацию преобразователей частоты и тиристорных преобразователей с коэффициентом загрузки 0,8 и более. Также рекомендовано выполнить переход на более эффективную и недорогую систему «трансформатор–преобразователь–электроприемник», если мощность трансформатора не превышает 1000 кВ·А. Эффективную защиту электродвигателей мощностью до 2500 кВт включительно можно обеспечить с помощью предлагаемого универсального RC-гасителя, при этом кратность перенапряжений не будет превышать 1,7.

Ключевые слова: качество электроэнергии, преобразователи частоты, частотно-регулируемый привод, высшие гармоники, коммутационные перенапряжения, RC-гаситель

Для цитирования: Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 356–368. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>

Power quality in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia

Vasiliy I. Panteleev*, Ilya S. Kuzmin**, Artem A. Zavalov***,
Aleksey V. Tikhonov***, Ekaterina V. Umetskaia*

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Rutas Group Limited Liability Company, Krasnoyarsk, Russia

***Research and production enterprise Rutas Limited Liability Company,

Abstract: This paper investigates the effect of the load factor of frequency converters and thyristor converters on electrical power quality. Recommendations for reducing the influence of higher harmonics and switching overvoltages on the

characteristics of electrical power are provided. Higher harmonics were measured by a PKK57 complex device for controlling electrical parameters and a digital oscilloscope of the Tektronix TDS 2024V type. Impulse switching overvoltages were recorded by an active resistance divider of the DNEK-10 type and the above-mentioned oscilloscope. The obtained data were processed by the Loginom 6.4 software and the methods of mathematical statistics. The lower threshold level of the load factor of frequency converters and thyristor converters was set equal to 0.8, at which the sinusoidal distortion of voltage curves correspond to the RF standard of electrical power quality. The suppression degree of higher harmonics from the 5th to 17th frequency by power transformers with a capacity of 250–6,300 kV·A ranged from 95 to 45%. The use of the 'transformer–converter–electric receiver' system as applied to the power supply systems of mining and processing enterprises was substantiated. It was shown that electric motors with a capacity of up to 2,500 kW inclusively require protection against switching overvoltages. Conventional RC-absorbers based on RC-circuits connected to the terminals of electric motors are shown to be highly efficient for protecting electric motors against switching overvoltages. Thus, the quality of electrical power in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia can be ensured by frequency converters and thyristor converters with a load factor of 0.8 or greater. Provided that the transformer capacity does not exceed 1,000 kV·A, a more efficient and less expensive 'transformer–converter–electrical receiver' system is recommended. Effective protection of electric motors of up to 2,500 kW inclusive can be provided using the proposed conventional RC absorber, which maintains the overvoltage rate at a level not exceeding 1.7.

Keywords: power quality, frequency converters, variable frequency drive, higher harmonics, switching overvoltages, RC snubber

For citation: Panteleev VI, Kuzmin IS, Zavalov AA, Tikhonov AV, Umetskaya EV. Power quality in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):356–368. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, выполненные на ряде горно-перерабатывающих предприятий, выявили, что основные показатели качества электрической энергии находятся в пределах норм, предусмотренных государственным стандартом России ГОСТ 32144–2013¹ «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»: отклонение и размах изменения напряжения, длительность провала напряжения, доза фликера, коэффициент несимметрии по обратной и нулевой последовательностям, отклонение частоты тока.

Особую озабоченность вызывает негативное влияние на качество электрической энергии высших гармоник тока и напряжения и импульсных перенапряжений.

Использование тиристорных преобразователей напряжения, преобразователей частоты и современных коммутационных аппаратов позволяет снизить затраты на переработку руды, но вызывает появление высших

гармоник и импульсных перенапряжений [1–10].

На горно-перерабатывающих предприятиях России в основном используются тиристорные преобразователи напряжения и преобразователи частоты мощностью до 750 кВт. В качестве современных коммутационных аппаратов используются вакуумные контакторы в сетях до 1000 В, а в сетях свыше 1000 В – вакуумные и элегазовые выключатели [11].

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СИСТЕМЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ–ДВИГАТЕЛЬ

Статистическая обработка экспериментальных данных, связанных с исследованием наличия высших гармоник тока и напряжения, показала, что значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой тока и напряжения в основном определяются коэффициентом загрузки преобразователей частоты или тиристорных преобразователей и практически не зависят от типа преобразователя.

¹ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. Росстандартом 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014.

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены зависимости коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и напряжения от коэффициента загрузки преобразователя, соответственно, для сетей до и свыше 1000 В.

Существующие методики выбора мощности преобразователей и опыт их эксплуатации показали, что преобразователи частоты и тиристорные преобразователи работают с не превышающим 60% коэффициентом загрузки. В этом случае коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях напряжением до и свыше 1000 В могут достигать значений равных 20% и 16%, что выше предельно-допустимых норм, предусмотренных государственным стандартом России¹, в 1,7 и 2 раза, соответственно. Это обстоятельство приводит к отказам контрольно-измерительной аппаратуры и нарушениям в системах управления технологическим процессом, что негативно отражается на качестве переработки руды.

Анализ представленных на рис. 1 и 2 зависимостей показывает, что при эксплуатации преобразователей с коэффициентом загрузки 0,8 и более значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения могут быть снижены до уровня 3% и 2%, соответственно, для сетей до и свыше 1000 В, что полностью соответствует требованиям государственного стандарта.

Снижения влияния высших гармоник на качество электрической энергии можно добиться не только за счет изменения коэффициента загрузки преобразователей частоты и тиристорных преобразователей, но и за счет замены системы «фильтр – преобразователь – электроприемник» на систему «трансформатор – преобразователь – электроприемник» [12]. Использование специальных схем соединения обмоток трансформаторов позволяет ограничить амплитуды отдельных гармоник тока и сократить их спектр.

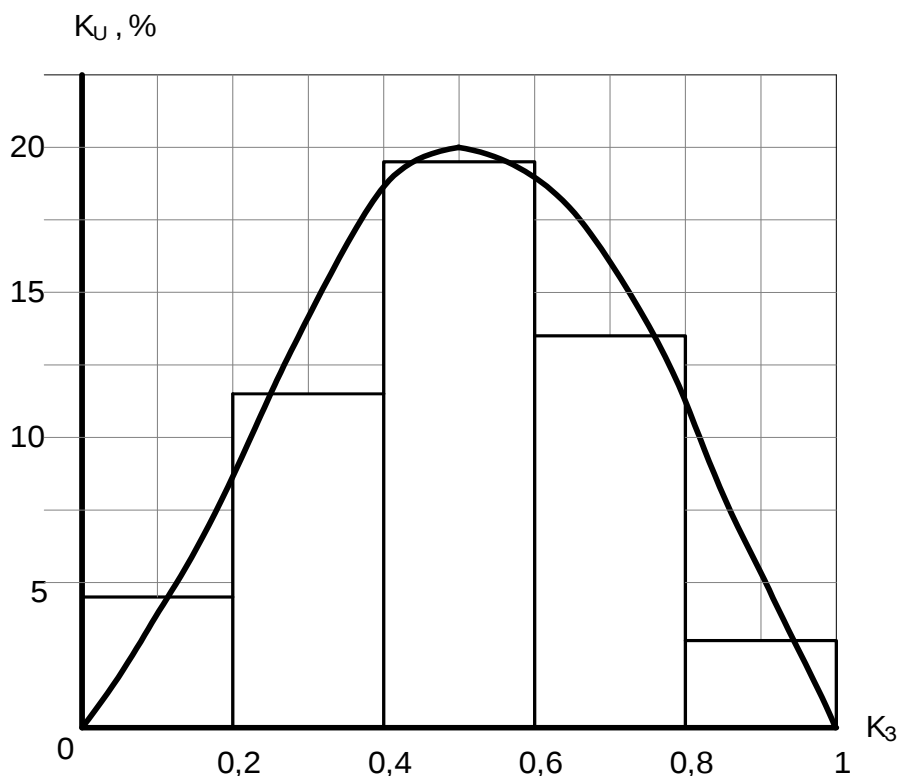


Рис. 1. Гистограмма и кривая, отображающие зависимость средних значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U от коэффициента загрузки преобразователя частоты K_3 в сетях до 1000 В

Fig. 1. Histogram and curve showing the dependence of average values of the distortion factor of the sinusoidal voltage curve K_U on the load factor of the frequency converter K_3 in the networks up to 1000 V

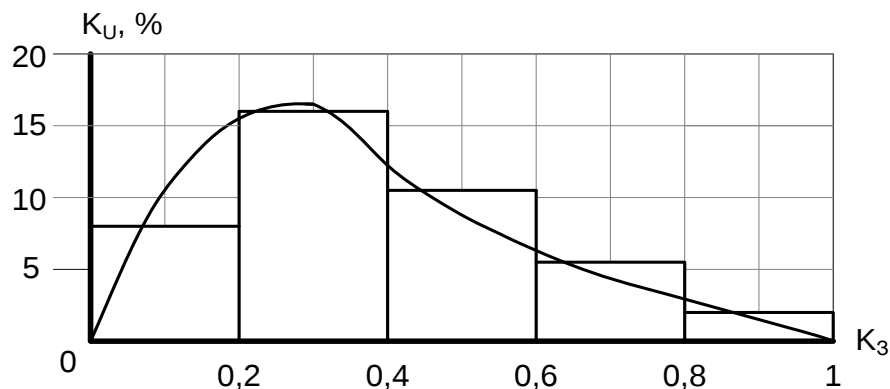


Рис. 2. Гистограмма и кривая, отображающие зависимость средних значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U от коэффициента загрузки преобразователя частоты K_3 в сети 6 кВ
 Fig. 2. Histogram and curve showing the dependence of average values of the distortion factor of the sinusoidal voltage curve K_U on the load factor of the frequency converter K_3 in the 6 kV network

Как показали исследования, силовые трансформаторы 6(10)/0,4(0,69) кВ и разделительные трансформаторы 6(10)/6(10) обладают высокой степенью подавления высших гармоник тока и напряжения, если мощ-

ность трансформатора не превышает 1000 кВ·А. На рис. 3 приведены зависимости степени подавления высших гармоник (γ) от мощности силовых трансформаторов.

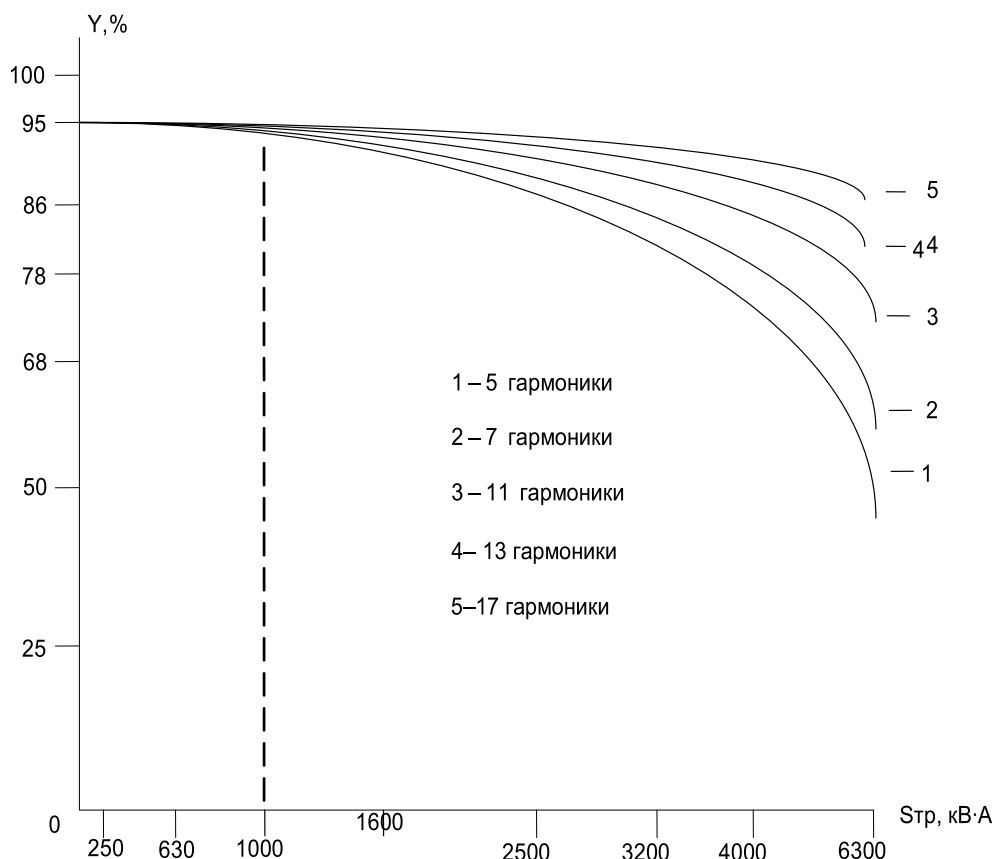


Рис. 3. Зависимость степени поглощения 5–17 гармоник тока и напряжения от мощности трансформатора
 Fig. 3. Absorption degree of 5–17 harmonics of current and voltage vs transformer power



Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, показывает, что степень подавления высших гармоник силовыми трансформаторами мощностью до 1000 кВ·А достигает 95%, что позволяет локализовать высшие гармоники в электрической цепи «преобразователь – электроприемник» и не допустить их проникновения в общую систему электропитания [13].

При использовании более мощных преобразователей (мощностью свыше 750 кВт) в сетях свыше 1000 В для подавления высших гармоник можно использовать параллельную работу трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А. Например, при использовании преобразователя с полной мощностью 2400 кВ·А в сетях свыше 1000 В для локализации высших гармоник можно использовать параллельную работу трех разделительных трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А.

Опыт эксплуатации тиристорных преобразователей и преобразователей частоты в сетях горно-перерабатывающих предприятий свыше 1000 В показывает, что данные устройства обладают низкой устойчивостью к перенапряжениям в режиме дугового однофазного замыкания на землю, так как перенапряжения могут достигать четырехкратного значения номинального напряжения [14]. В этом случае применение разделительных трансформаторов позволит не только локализовать высшие гармоники на участке сети «разделительный трансформатор – преобразователь – электроприемник», но и защитить преобразователь от перенапряжений в режиме дугового однофазного замыкания на землю, так как преобразователь не будет иметь гальванической (непосредственной) связи в системах электропитания.

Анализ стоимости фильтрокомпенсирующих устройств на напряжение 6(10) кВ, применяющихся с тиристорными преобразователями частоты мощностью 2000 кВт в зависимости от функционала частотно-регулируемого привода и разделительных трансформаторов аналогичной мощности на напряжение 6(10) кВ, показал, что стоимость фильтрокомпенсирующего устройства превышает стоимость разделительного трансформатора в 5–6 раз.

Таким образом, использование разделительных трансформаторов взамен фильтрокомпенсирующих устройств в частотно-регулируемом приводе позволит снизить расходы в 2–2,5 раза. Последнее обстоятельство указывает на то, что использование системы «разделительный трансформатор – преобразователь – электроприемник» позволяет не только повысить качество электрической энергии за счет эффективной локализации высших гармоник, обеспечить защиту преобразователей от перенапряжений в режиме однофазного замыкания на землю, но и снизить стоимость.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Использование вакуумных и элегазовых выключателей для коммутации электродвигателей и трансформаторов способствует возникновению значительных импульсных перенапряжений.

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости импульсных коммутационных перенапряжений от мощности высоковольтных электродвигателей, коммутацию которых осуществляют вакуумные, элегазовые, масляные и электромагнитные выключатели [15, 16].

Согласно ГОСТ Р 32144–2013¹, допустимая кратность коммутационных перенапряжений в сетях 6–10 кВ не должна превышать значение 4,3.

Сопоставляя данные, представленные на рис. 4, с допустимой кратностью коммутационных перенапряжений можно утверждать, что при коммутации высоковольтных электродвигателей мощностью до 2000 кВт масляными, элегазовыми и вакуумными выключателями кратность коммутационных перенапряжений выше допустимого значения. Следовательно, указанные электродвигатели необходимо эксплуатировать со средствами защиты от перенапряжений.

Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений для электрических двигателей мощностью 630 кВт составляют 2,75 при коммутации асинхронного электродвигателя электромагнитным выключателем, 3 – при коммутации

синхронного электродвигателя электромагнитным выключателем, 4,1 – при коммутации асинхронного электродвигателя масляным выключателем, 4,35 – при коммутации синхронного электродвигателя масляным выключателем, 4,85 – при коммутации асинхронного электродвигателя элегазовым выключателем, 5,2 – при коммутации синхронного электродвигателя элегазовым выключателем, 5,8 – при коммутации асинхронного электродвигателя вакуумным выключателем, 6,3 – при коммутации синхронного электродвигателя вакуумным выключателем.

Таким образом, при коммутации электродвигателей мощностью 630 кВт современными быстродействующими выключателями требуется использовать защиту от коммутационных перенапряжений.

В настоящее время для защиты электродвигателей от коммутационных перенапряжений используются ограничители перена-

пряжений нелинейные (ОПН), а также RC-ограничители и RC-гасители которые представляют собой демпфирующие резистивно-емкостные цепи [17–20].

Исследования эффективности вышеперечисленных устройств защиты от перенапряжений показали, что использование ОПН не всегда позволяет обеспечить требуемый уровень ограничения коммутационных перенапряжений из-за наличия зоны замирания в работе ОПН. В частности, при частоте коммутационного импульса свыше 45 кГц за первый момент коммутации ОПН не реагирует на возникшие перенапряжения и начинает ограничивать перенапряжения спустя 3–4 периода высокочастотных колебаний. Такого промежутка времени достаточно для того, чтобы коммутационные перенапряжения достигали максимальных значений, то есть ОПН не ограничивает максимально возможные коммутационные перенапряжения [21].

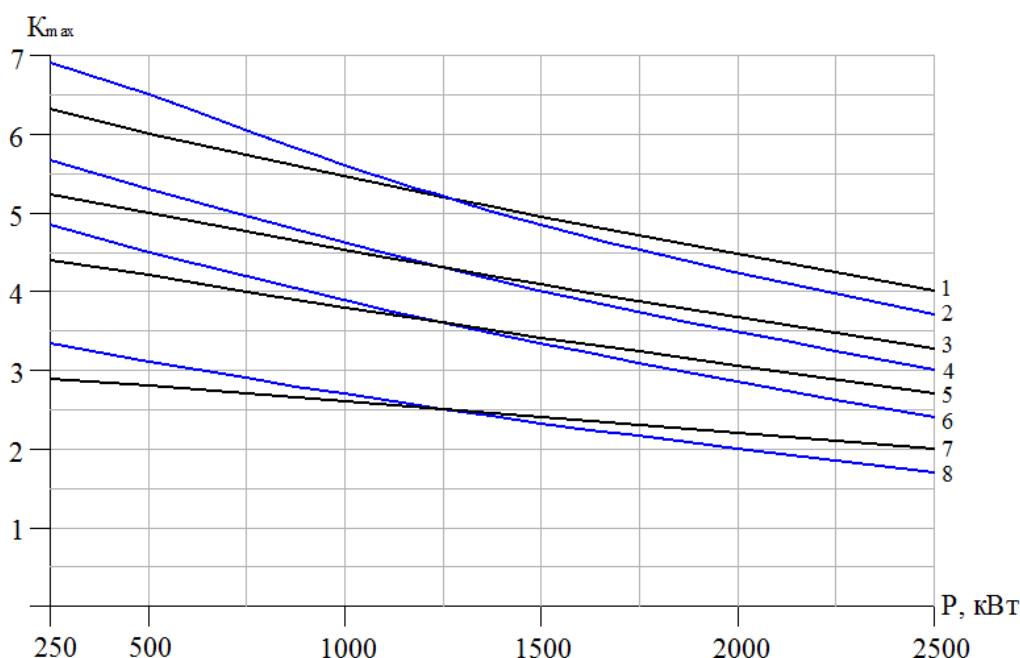
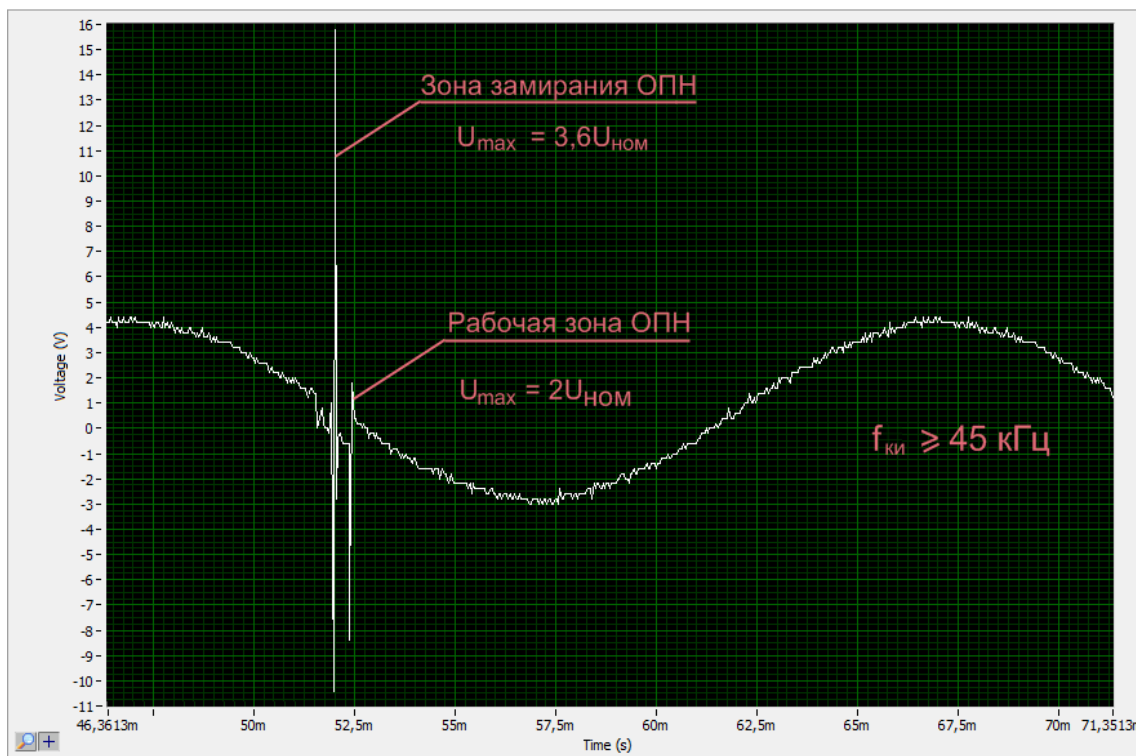
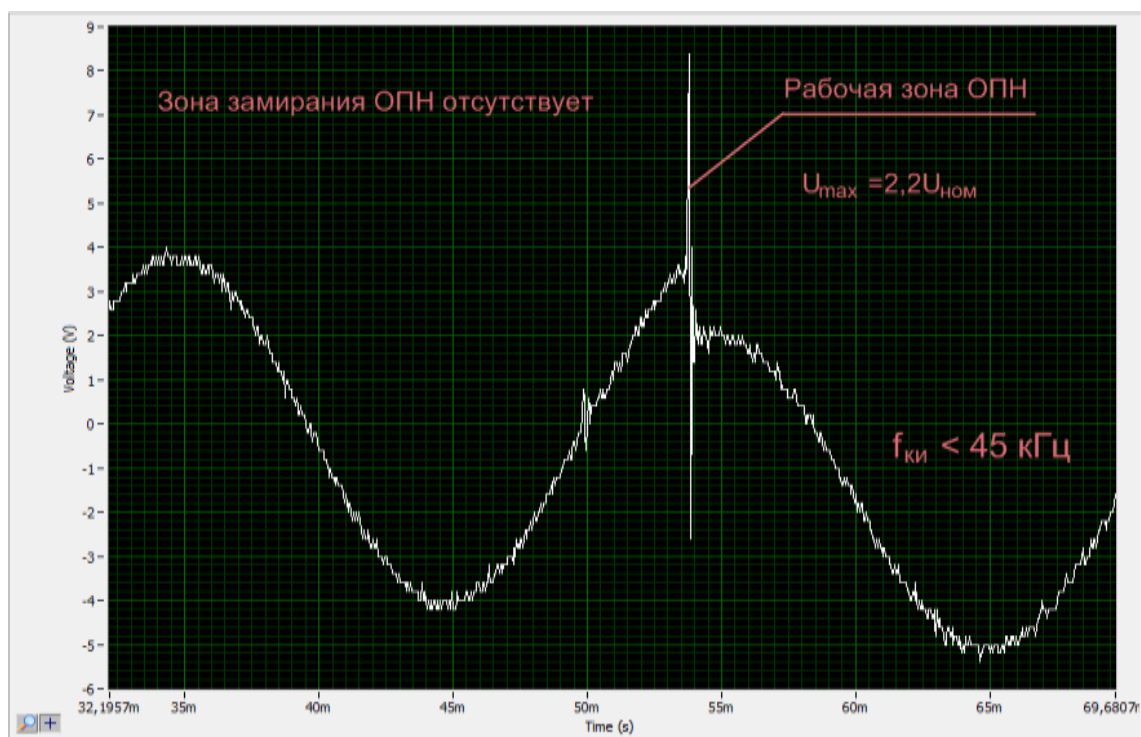


Рис. 4. Максимальные значения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений для синхронных и асинхронных электродвигателей в зависимости от типа выключателя: 1 – асинхронный электродвигатель с вакуумным выключателем; 2 – синхронный электродвигатель с вакуумным выключателем; 3 – асинхронный электродвигатель с элегазовым выключателем; 4 – синхронный электродвигатель с элегазовым выключателем; 5 – асинхронный электродвигатель с масляным выключателем; 6 – синхронный электродвигатель с масляным выключателем; 7 – асинхронный электродвигатель с электромагнитным выключателем; 8 – синхронный электродвигатель с электромагнитным выключателем

Fig. 4. Maximum values of switching overvoltage multiplicity for synchronous and asynchronous motors depending on the circuit breaker type: 1 – asynchronous electric motor with a vacuum switch; 2 – synchronous electric motor with a vacuum switch; 3 – asynchronous electric motor with a gas switch; 4 – synchronous electric motor with a gas switch; 5 – asynchronous electric motor with an oil switch; 6 – synchronous electric motor with an oil switch; 7 – asynchronous electric motor with an electromagnetic switch; 8 – synchronous electric motor with an electromagnetic switch



a



b

Рис. 5. Осциллограммы, отражающие «зону замирания» в работе ограничителя перенапряжений нелинейного:
 а – отключение синхронного двигателя мощностью 250 кВт вакуумным выключателем;
 б – отключение синхронного двигателя мощностью 2500 кВт элегазовым выключателем
 Fig. 5. Oscillograms reflecting the "fading zone" in the operation of a surge arrester:
 а – disconnection of the 250 kW synchronous motor by a vacuum switch;
 б – disconnection of the 2500 kW synchronous motor by a gas circuit breaker

В качестве примера на рис. 5 представлена зона замирания в работе ОПН. В первом случае осциллограмма фиксировалась при отключении синхронного двигателя мощностью 250 кВт вакуумным выключателем, наблюдается зона замирания в работе ОПН. Во втором случае осциллограмма фиксировалась при отключении синхронного двигателя мощностью 2500 кВт элегазовым выключателем, зоны замирания в работе ОПН не наблюдается.

Установлено, что с увеличением мощности электрического двигателя частота коммутационного импульса снижается, и при мощности электрического двигателя 2500 кВт и более значение частоты коммутационного импульса меньше 40 кГц при условии, что отключение электродвигателя происходит в штатном рабочем режиме.

ОПН, как правило, собираются по схеме «звезда с заземленной нейтральной точкой». В этом случае при возникновении дугового однофазного замыкания на землю в сетях 6–10 кВ и работе защиты от однофазных замыканий на землю на сигнал или с выдержкой времени ОПН, связанный с неповрежденными фазами сети, может быть подвержен термическому разрушению. Разрушение ОПН произойдет вследствие протекания через него длительных значительных токов, превышающих значения тока термической стойкости ОПН, который, как правило, составляет 500 А.

Пример термического разрушения ОПН в режиме дугового однофазного замыкания на землю приведен на рис. 6.

Наиболее эффективными средствами

ограничения коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутации электрических двигателей, являются RC-ограничители и RC-гасители, в конструкции которых используются RC-цепи. Использование RC-цепей позволяет за счет емкости конденсатора снизить волновое сопротивление электродвигателя, что, в свою очередь, при одном и том же срезе тока уменьшает величину коммутационных перенапряжений, так как величина перенапряжений определяется по формуле:

$$U_{max} = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1)$$

где i_0 – срез тока в выключателе, А; L – индуктивность обмотки электрического двигателя, Гн; C – сосредоточенная емкость на зажимах электрического двигателя с учетом емкости обмоток по отношению к земле, Ф.

Кратность коммутационных перенапряжений рассчитывалась по выражению:

$$K_{кп} = \frac{U_{max}}{U_{ном}} = \frac{0,82 \times U_{max}}{U_{фа}}, \quad (2)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение, В; $U_{фа}$ – напряжение фазное амплитудное, В.

На рис. 7–9 приведены осциллограммы коммутационных перенапряжений, возникающие при отключении электродвигателя мощностью 630 кВт, без защиты от коммутационных перенапряжений, при использовании ОПН и при использовании RC-гасителя, соответственно.



Рис. 6. Термическое разрушение ограничителя перенапряжений нелинейного в режиме дугового однофазного замыкания на землю

Fig. 6. Thermal destruction of the surge arrester in a single arc fault mode

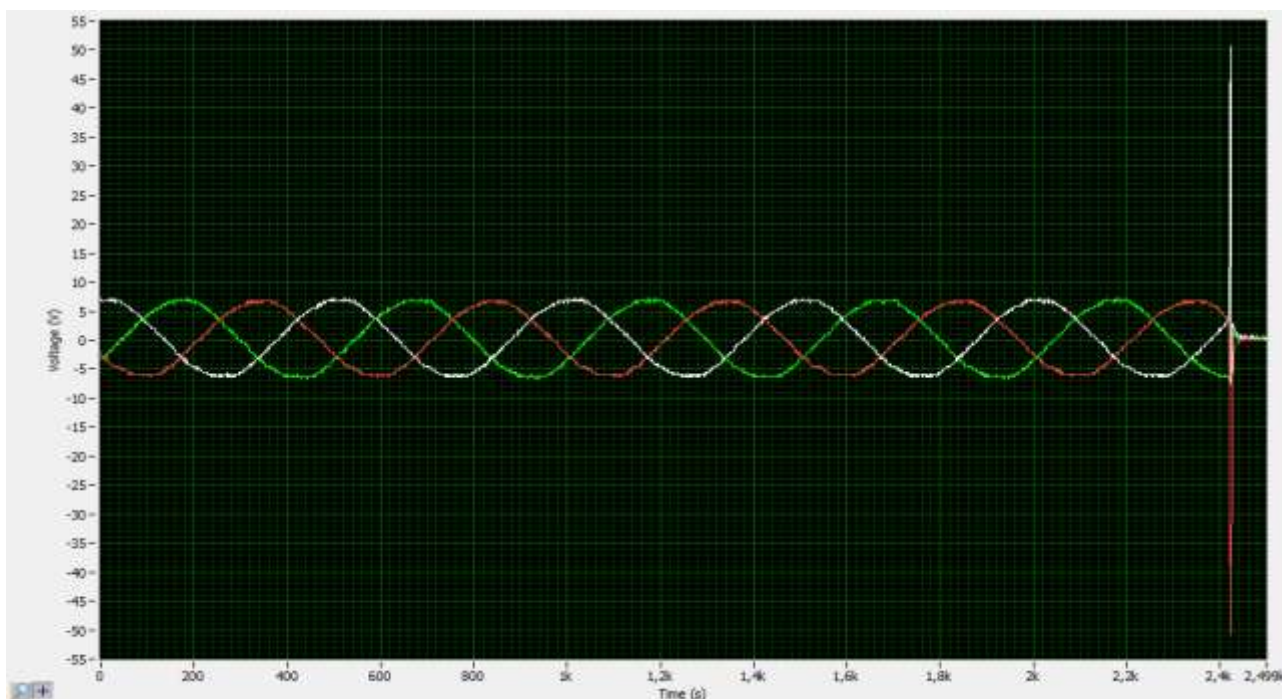


Рис. 7. Осциллограмма коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении электродвигателя мощностью 630 кВт, без защиты от коммутационных перенапряжений. Кратность коммутационных перенапряжений составляет 5,97

Fig. 7. Oscillogram of switching overvoltages arising when the 630 kW electric motor is disconnected without protection against switching overvoltages. The multiplicity of switching overvoltages is 5.97

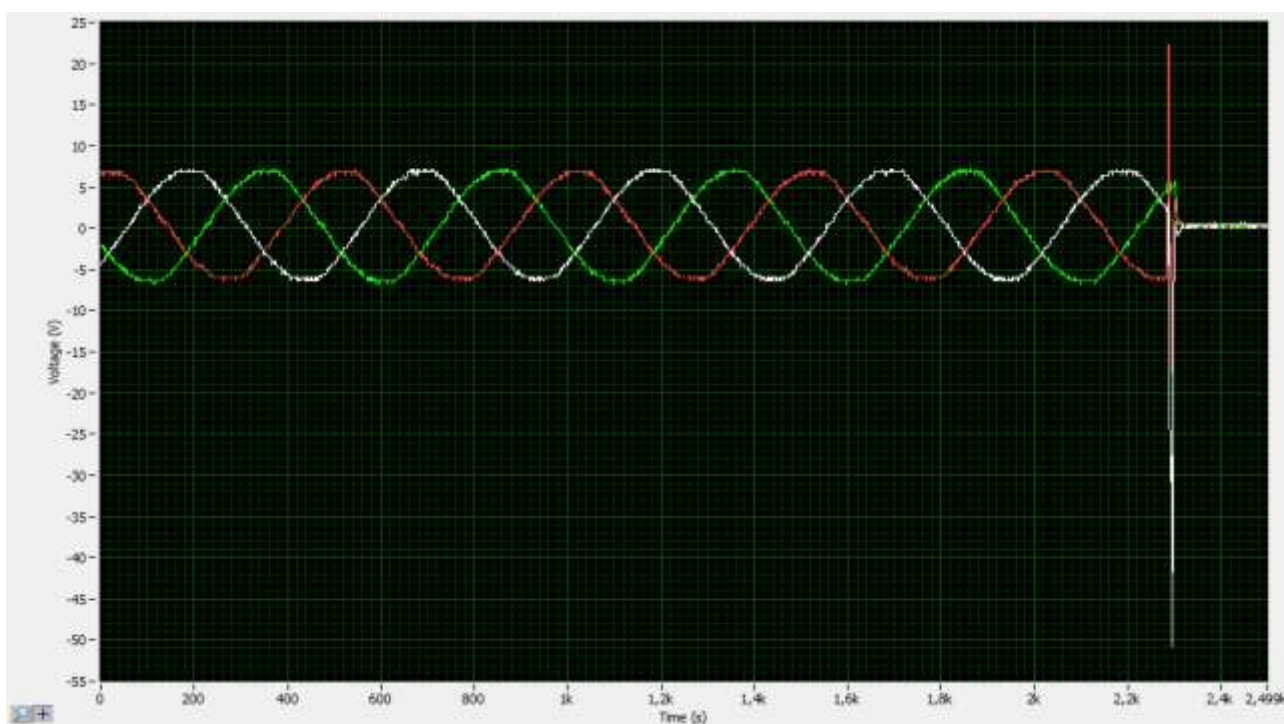


Рис. 8. Осциллограмма коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении электродвигателя мощностью 630 кВт, при использовании ограничителя перенапряжений нелинейного. Кратность коммутационных перенапряжений составляет 5,97

Fig. 8. Oscillogram of switching overvoltages arising when the 630 kW electric motor is disconnected and the surge arrester is used. The multiplicity of switching overvoltages is 5.97

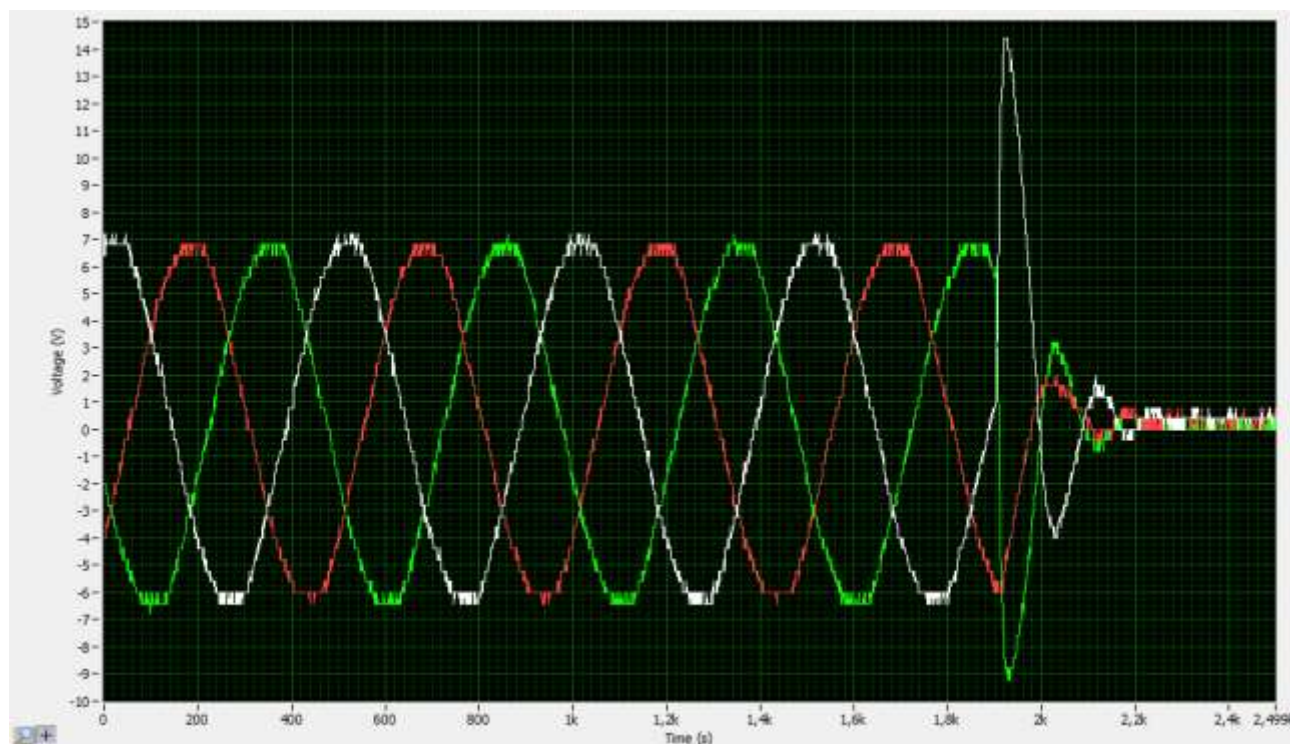


Рис. 9. Осциллограмма коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении электродвигателя мощностью 630 кВт, при использовании RC-гасителя.

Кратность коммутационных перенапряжений составляет 1,69

Fig. 9. Oscillogram of switching overvoltages arising when the 630 kW electric motor is disconnected and the RC snubber is used. The multiplicity of switching overvoltages is 1.69

Анализ представленных осциллограмм показывает, что использование ОПН для защиты электродвигателя практически не приводит к ограничению коммутационных перенапряжений. В свою очередь, использование RC-гасителей позволило снизить возникновение коммутационного перенапряжения до кратностей, не превышающих значение 1,7. Очевидно, что подобная кратность коммутационных перенапряжений не представляет опасности для изоляции обмоток электродвигателя, так как амплитудное значение напряжения составляет 14,2 кВ при номинальном действующем значении 10 кВ.

Приведенные осциллограммы были получены при условии, что данные средства защиты подключались к зажимам электродвигателя.

Следует также отметить, что ОПН практически не влияет на крутизну коммутационно-

го импульса, то есть на скорость нарастания напряжения, тогда как RC-гаситель ограничивает не только амплитуду коммутационного импульса, но и существенно снижает скорость нарастания напряжения коммутационного импульса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эксплуатация преобразователей частоты и тиристорных преобразователей с коэффициентом загрузки 0,8 и более, переход от системы «фильтр – преобразователь – электроприемник» на систему «трансформатор – преобразователь – электроприемник» и эффективное ограничение коммутационных перенапряжений с помощью RC-гасителей будут способствовать повышению качества электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России.

Список литературы

1. Кугушева Н.Н., Семёнов А.С., Якушев И.А., Павлова С.Н. Техничко-экономические особенности выбора ча-

стотно-регулируемых электроприводов для технологических установок алмазодобывающих предприятий



// Инновации и инвестиции. 2021. № 1. С. 145–149.

2. Брыкалов С.М., Балыбердин А.С., Трифонов В.Ю., Засухин Р.В. Ключевые направления повышения энергетической эффективности крупных промышленных предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 5. С. 10–18. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>

3. Семёнов А.С., Егоров А.Н., Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Якушев И.А., Федоров А.В. Анализ работы систем частотно-регулируемого электропривода при влиянии высших гармоник // Электротехнические системы и комплексы: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 22–25 октября 2019 г.). Уфа: Изд-во УГАТУ, 2019. С. 178–184.

4. Егоров А.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты Power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 4. С. 86–93.

5. Клундук Г.А. Влияние преобразователя частоты на энергосбережение насосного агрегата и электромагнитная совместимость оборудования // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 21–23 апреля 2020 г.). Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2020. С. 153–157.

6. Бебихов Ю.В., Егоров А.Н., Матул Г.А., Семёнов А.С., Харитонов Я.С. Поиск путей повышения эффективности применения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в условиях горного производства // Естественные и технические науки. 2018. № 8. С. 228–234.

7. Shevryev Y.V., Shevryeva N.Y. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry // Gornyi Zhurnal. 2019. Iss. 1. P. 66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>

8. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. Iss. 2. <https://doi.org/10.3390/app11020538>

9. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 937. Iss. 2. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>

10. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor // Innovative Data Communication Technologies and Application. 2021. Vol. 59. P. 97–105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8

11. Скакунов Д.А. Влияние силовой электроники на качество электрической энергии и методы фильтрации высших гармоник // сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн.

конф. (г. Новокузнецк, 2004 г.). Новокузнецк, 2004. С. 253–257.

12. Akagi H. Active Harmonic Filters // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. Iss. 12. P. 2128–2141.

13. Кузьмин С.В. Использование силовых трансформаторов для локализации высших гармоник в системах электроснабжения 0,4–10 кВ // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 2009 г.). Красноярск, 2009. С. 268–270.

14. Кузьмин Р.С., Кузьмин И.С., Меньшиков В.А., Кузьмин С.В., Куликовский В.С. Метод оценки и прогнозирования перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ как средство повышения уровня электробезопасности на горных предприятиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 5. С. 116–132. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>

15. Кузьмин С.В., Майнагашев Р.А., Гаврилова Е.В., Немков С.В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 4. С. 53–54.

16. Kuzmin S.V., Umetskaia E.V., Zavalov A.A. Influence of power quality on value of switching overvoltages in networks 6–10 kV // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271527>

17. Sowa P., Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem // International Journal of GEOMATE. 2020. Vol. 19. Iss. 72. P. 180–189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>

18. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 122. P. 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>

19. Fritz N., Engelmann G., De Doncker R.W. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells // 21st European Conference on Power Electronics and Applications. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>

20. De Paula dos Santos D., Sartori C.A.F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters // IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>

21. Кузьмин С.В., Гаврилова Е.В., Барышников Д.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6–10 кВ горнодобывающих предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 2. С. 41–44.

References

1. Kugusheva NN, Semenov AS, Yakushev IA, Pavlova SN. Technical and economic features of choice of frequency-controlled electric drives for technological units of diamond mining enterprises. *Innovatsii i investitsii = Innovation & Investment*. 2021;1:145–149. (In Russ.)
2. Brykalov SM, Balyberdin AS, Trifonov VYu, Zasukhin RV. Key approaches to energy efficiency improvement at large manufacturing companies. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2020;5:10–18. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>
3. Semenov AS, Egorov AN, Kharitonov YaS, Bebikhov YuV, Yakushev IA, Fedorov AV. Analysis of the operation of variable-frequency electric drive systems under the influence of high harmonics. In: *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii = Electro-technical systems and complexes: collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 22–25 October 2019, Ufa. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2019, vol. 1, p. 178–184. (In Russ.)
4. Egorov AN, Semenov AS, Fedorov OV. The practical experience of the application of the frequency converter power flex 7000 in the mining industry. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva*. 2017;4:86–93. (In Russ.)
5. Klunduk GA. Influence of a frequency converter on the power saving of a pump unit and electromagnetic compatibility of equipment. In: *Nauka i obrazovanie. Opyt, problemy, perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii = Science and Education. Experience, problems, development prospects: Collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 21–23 April 2020, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2020, vol. 1, p. 153–157. (In Russ.)
6. Bebikhov YuV, Egorov AN, Matul GA, Semenov AS, Kharitonov YaS. Search of ways to improve the efficiency of application of high-voltage frequency-regulated electric drive in conditions of mining production. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*. 2018;8:228–234. (In Russ.)
7. Shevyrev YV, Shevyreva NY. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019;1:66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>
8. Ashraf N, Abbas G, Abbassi R, Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(2). <https://doi.org/10.3390/app11020538>
9. Dutta N, Kaliannan P, Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;937(2):012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>
10. Jyothi R, Sumitgupta, Rao KU, Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor. In: *Innovative Data Communication Technologies and Application*. 2021, vol. 59, p. 97–105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8
11. Skakunov DA. Influence of power electronics on electric power quality and methods of higher harmonics filtering. In: *Trudy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2004, Novokuznetsk. Novokuznetsk; 2004, vol. 1, p. 253–257. (In Russ.)
12. Akagi H Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(12):2128 – 2141.
13. Kuz'min SV Use of power transformers for localization of higher harmonics in 0.4 – 10 kV power supply systems. In: *Energoeffektivnost' sistem zhizneobespecheniya goroda: Trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Energy efficiency of city life support systems: Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2009, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2009, vol. 1, p. 268–270. (In Russ.)
14. Kuzmin RS, Kuzmin IS, Menshikov VA, Kuzmin SV, Kulikovskii VS. Method of assessment and prediction of overvoltage caused by single-phase arc ground short circuits in the 6–10 kV mains as a way of increasing the electrical safety level in mining facilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;5:116–132. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>
15. Kuzmin SV, Mainagashev RA, Gavrilova EV, Nemkov SV. The experience of operating the protection means against the commutation overvoltage in the systems of supplying mining companies with 6 kV electric power. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electromechanics*. 2011;4:53–54. (In Russ.)
16. Kuzmin SV, Umetskaia EV, Zavalov AA. Influence of power quality on value of switching overvoltages in networks 6–10 kV. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271527>
17. Sowa P, Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem. *International Journal of GEOMATE*. 2020;19(72):180–189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>
18. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;122:106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>
19. Fritz N, Engelmann G, De Doncker RW. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells. In: *21st European Conference on Power Electronics and Applications*. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>
20. De Paula dos Santos D, Sartori CAF. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters. In: *IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference*. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>



21. Kuzmin SV, Gavrilova EV, Baryshnikov DV. The influence of the arc extinction process in high-voltage switches on the communication overvoltage value appearing in the

6–10 kV circuits of mining enterprises. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electro-mechanics*. 2009;2:41–44. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пантелеев Василий Иванович,
профессор, доктор технических наук,
заведующий кафедрой электроэнергетики,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26,
Россия;
e-mail: pvi0808@rambler.ru

Кузьмин Илья Сергеевич,
генеральный директор,
ООО ГК «Рутас»,
660064, г. Красноярск, ул. Вавилова, 2/ж, Россия;
e-mail: info@rutas.group

Завалов Артем Александрович,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия;
✉ e-mail: zavalovartem@mail.ru

Тихонов Алексей Валерьевич,
инженер,
ООО «НПП «Рутас»,
660025, г. Красноярск, ул. Вавилова, 72, Россия;
e-mail: rutas2004@list.ru

Умецкая Екатерина Владимировна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электрификации
горно-металлургического производства,
Сибирский федеральный университет,
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия;
e-mail: rutas2004@list.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.03.2021; одобрена после рецензирования 19.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasily I. Panteleev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Electric Power,
Siberian Federal University,
26, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk 660074,
Russia;
e-mail: pvi0808@rambler.ru

Ilya S. Kuzmin,
Chief Executive Officer,
Rutas Group Limited Liability Company,
2/ж, Vavilov St., Krasnoyarsk 660064, Russia;
e-mail: info@rutas.group

Artem A. Zavalov,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia;
✉ e-mail: zavalovartem@mail.ru

Aleksey V. Tikhonov,
Engineer,
Research and production enterprise Rutas Limited
Liability Company,
72, Vavilov St., Krasnoyarsk 660025, Russia;
e-mail: rutas2004@list.ru

Ekaterina V. Umetskaia,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Electrification
of Mining and Metallurgy Industry,
Siberian Federal University,
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia;
e-mail: rutas2004@list.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 10.03.2021; approved after reviewing 19.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.



Оценка эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередачи с учетом режима прилегающей сети

© В.П. Шойко, К.В. Духанина

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме: Целью исследований явилась разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования энергосистем, в частности, за счет повышения пропускной способности электропередач. Для решения указанной задачи использовалась FACTS-технология на основе фазоповоротного трансформатора. В работе применялась модель данного трансформатора с тиристорным коммутатором, разработанная в Энергетическом научно-исследовательском институте им. Г.М. Кржижановского. Исследование эффективности фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередач проводилось путем определения максимально допустимых перетоков сечения Барнаульско-Бийского узла-2. Расчеты выполнялись для нормальной и различных послеаварийных схем с использованием программного комплекса RastrWin3. При исследованиях учитывалось регулирование отпаяк фазоповоротного трансформатора, рассматривались различные места его установки. Показано, что для рассматриваемого сечения применение фазоповоротного трансформатора позволило увеличить максимально допустимый переток на 4–12%. Выявлено, что определяющим фактором, ограничивающим максимально допустимый переток в сечении Барнаульско-Бийского узла-2, является токовая перегрузка линий 110 кВ прилегающей сети. Причем наибольший эффект повышения максимально допустимого перетока имел место при установке фазоповоротного трансформатора не на линии 220 кВ, входящей в сечение, а на примыкающей к сечению линии 220 кВ, параллельной линиям 110 кВ, которые перегружались при утяжелении режима. Выполнены аналогичные расчеты для нормальной и послеаварийных схем альтернативного варианта, который предполагает замену проводов и установку автоматики ограничения перегрузки оборудования на перегружаемых линиях 110 кВ. Согласно проведенным исследованиям установлено, что эффект повышения пропускной способности этого варианта составил около 4%.

Ключевые слова: энергосистема, электропередача, фазоповоротный трансформатор, пропускная способность, максимально допустимый переток, сечение

Для цитирования: Шойко В.П., Духанина К.В. Оценка эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередачи с учетом режима прилегающей сети. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 369–379. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>

Use of a phase-shifting transformer for increasing the power transmission capacity, taking into account the mode of the adjacent network

Vladimir P. Shoiko, Kseniya V. Dukhanina

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: In this research, we develop measures aimed at improving the efficiency of power systems by increasing their transmission capacity. To this end, a FACTS system based on the phase-shifting transformer with a thyristor switch developed at the Power Engineering Institute named after G.M. Krzhizhanovsky was used. The efficiency of the phase-shifting transformer under study for increasing the transmission capacity of power systems was determined by the maximum permissible cross-section flows of the Barnaul-Biysk node-2. The calculations were performed for normal and various post-accident schemes using the RastrWin3 software package. Such factors as the regulation of the taps of the phase-shifting transformer and various places of its installation were considered. For the section under consideration, the phase-shifting transformer increased the maximum permissible flow by 4–12%. The determining factor limiting the maximum permissible flow in the Barnaul-Biysk node-2 was found to be the current overload of the 110 kV lines of the adjacent network. The greatest effect of increasing the maximum permissible overflow was noted when the phase-shifting

transformer was installed on the 220 kV line adjacent to the section, parallel to the 110 kV lines (which were overloaded when the mode became heavier), rather than on the 220 kV line included in the section. Similar calculations were performed for normal and post-accident schemes of an alternative option, which involved replacing wires and installing automatic equipment for limiting equipment overload on overloaded 110 kV lines. The obtained results show that the effect of increasing the transmission capacity for this option comprised 4%.

Keywords: power system, power transmission, phase-shifting transformer, throughput capacity, maximum allowable flow, cross section

For citation: Shoiko VP, Dukhanina KV. Use of a phase-shifting transformer for increasing the power transmission capacity, taking into account the mode of the adjacent network. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):369–379. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>

ВВЕДЕНИЕ

Расширение возможностей управления процессами в электрических системах дает управление фазами режимных параметров, обуславливающих перераспределение активных и реактивных мощностей по элементам электропередачи. Теоретические и практические аспекты применения фазового управления решены в работах отечественных и зарубежных ученых: В.Г. Холмского, В.М. Чебана, А.Х. Калюжного, Ю.Г. Шакаряна, Дж. Вербумена и других исследователей¹ [1–5].

В настоящее время повышение эффективности функционирования энергосистем, в частности, повышение пропускной способности электропередач достигается применением FACTS-технологий (от англ. Flexible Alternative Current Transmission System). Основы FACTS-технологий изложены в работах [6, 7]. FACTS-технологии реализуются с помощью различных технических устройств. Одним из таких устройств является фазоповоротный трансформатор (ФПТ). Следует отметить, что ведущие зарубежные энергокомпании достигли большого прогресса в части внедрения ФПТ в энергосистемах. Представительный информационно-аналитический обзор по применению ФПТ в мире приведен в работе [8]. Там же отмечено, что опыт разработки и эксплуатации ФПТ – в первую очередь в таких странах как Великобритания, Франция, Бельгия, Нидерланды – убедительно свидетельствует об их эффективности.

Применение данной инновационной технологии в России и СНГ находится на начальном этапе. ФПТ впервые в СНГ применен в Казахстане в 2008 г. [9]. В России ввод в опытную эксплуатацию ФПТ состоялся в 2019 г.² [10]. Устройство, разработанное совместным предприятием «Силовые машины – Тошиба. Высоковольтные трансформаторы» обеспечило управляемое перераспределение потоков активной мощности между распределительными устройствами 500 и 220 кВ Волжской ГЭС, что позволило (при необходимости) выдать в энергосистему всю располагаемую мощность электростанции и гибко управлять нагрузкой линий электропередач. По результатам опытной эксплуатации «Русгидро» планирует сформировать перечень объектов, где будут применять ФПТ. При успешном завершении опытной эксплуатации «Системный оператор» также инициирует работы по широкому внедрению ФПТ в тех сегментах Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) России, где их применение технологически и экономически целесообразно.

В настоящее время работы по применению ФПТ в энергосистемах ведутся как в нашей стране, так и за рубежом. Они касаются выбора мест установки ФПТ, алгоритмов их настройки [11–13]. К важным исследованиям можно отнести и такие исследования, в которых выполняется оценка эффективности ФПТ для повышения пропускной способности

¹Чебан В.М., Ландман А.К., Фишов А.Г. Управление режимами электроэнергетических систем в аварийных ситуациях: учеб. пособ. для электроэнергет. спец. вузов. М.: Изд-во «Высшая школа», 1990. 144 с.

²В России впервые введен в эксплуатацию фазоповоротный трансформатор [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2019/05/22/v-rossii-vpervye-vveden-v-ekspluatatsiyu-fazopovorotnyj-transformator/> (04.02.2021).



электропередач конкретных энергосистем [14, 15].

Учитывая вышесказанное, можно считать актуальной задачей определение целесообразных мест установки ФПТ для повышения пропускной способности электропередач.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с растущими потребностями в электрической энергии требуется вырабатывать и передавать по внутрисистемным и межсистемным линиям связи большие по величине мощности. Поскольку многие линии электропередач были построены давно и не были рассчитаны на такую перспективную нагрузку, зачастую возникают проблемы с недопустимостью передачи мощностей по линиям по условиям устойчивости, нежелательного снижения напряжения в отдельных узлах или из-за токовой перегрузки линий. Такие проблемы встречаются в Алтайской энергосистеме, которая является дефицитной и питается со стороны смежных энергосистем: российских, а также энергосистемы Казахстана.

Основными генерирующими объектами Алтайской энергосистемы являются следующие теплоэлектроцентрали (ТЭЦ): Барнаульская ТЭЦ-2 с установленной мощностью 275 МВт, Барнаульская ТЭЦ-3 с установленной мощностью 445 МВт, Бийская ТЭЦ с установленной мощностью 510 МВт и ТЭЦ АКЗХ с установленной мощностью 200 МВт.

Алтайская энергосистема содержит несколько установленных для управления электроэнергетическим режимом контролируемых сечений. Одним из основных сечений является Барнаульско-Бийский узел-2 (ББУ-2). В состав сечения ББУ-2 входят четыре линии электропередачи 220 кВ: Барнаульская – Власиха, Барнаульская – Чесноковская (1СШ), Шпагино (отпайка 1) – Чесноковская (2СШ), Шпагино (отпайка 2) – Чесноковская (1СШ) (рис. 1).

Элементы, входящие в состав контролируемого сечения, входят в состав транзита Беловская ГРЭС – Барнаульская – Иртышская. Данный транзит шунтирует связь 500 кВ между объединенными энергосистемами (ОЭС) Казахстана и ОЭС Сибири. При этом

по основной сети 500 кВ возможны режимы с перетоками «в Сибирь» или «в Казахстан». Направление перетока определяется суммарным перетоком по высоковольтным линиям (ВЛ) 500 кВ Барнаульская – Рубцовская и Экибастузская-1150 – Алтай.

На переток в исследуемом сечении влияют смежные энергосистемы: Новосибирская, Томская, Кузбасская и др. Наиболее влияющими энергосистемами являются избыточные Кузбасская, поскольку рассматриваемый транзит берет свое начало на Беловской ГРЭС, а также Красноярская, связанная с Алтайской энергосистемой через подстанцию Алтай, и энергосистема Казахстана. Избыток мощности со стороны ТЭЦ Алтайского коксохимического завода (АКХЗ) и Кузбасской энергосистемы передается по линиям 220 кВ: отпайки на подстанции (ПС) Шпагино – Чесноковская. Со стороны Красноярска и Казахстана переток активной мощности направляется в сторону линий 220 кВ Барнаульская – Власиха, Барнаульская – Чесноковская.

МОДЕЛЬ ФАЗОПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ФПТ предназначен для изменения угла фазового сдвига по концам линии, в которую он включен. В состав фазоповоротного устройства входит автотрансформатор, называемый в ФПТ «шунтовым», а также вольтодобавочный трансформатор, который обычно называют «сериесным». Изменяя напряжение на сериесной обмотке можно осуществлять поворот вектора суммарного напряжения в начале сети, и, следовательно, управлять углом между напряжениями в начале и конце линии, изменяя поток мощности, передаваемой по ней.

В работе использовалась модель ФПТ. Сам ФПТ с тиристорным коммутатором и его модель были разработаны в АО «ЭНИН». В работах [16–19] представлена схема фазоповоротного устройства, описаны принцип его работы и режимы управления тиристорным коммутатором. Получена взаимосвязь входного и выходного напряжения, которая описывается следующим выражением (на примере фазы А):

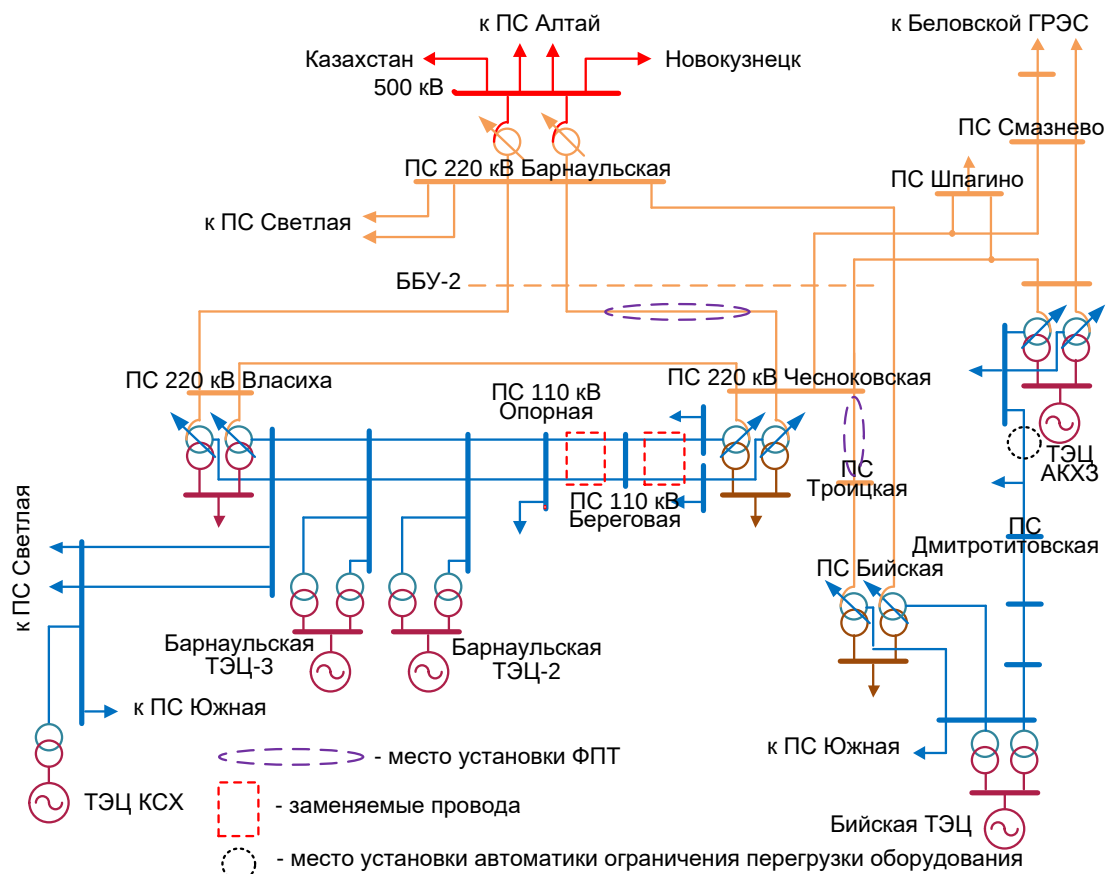


Рис. 1. Фрагмент сети, прилегающий к сечению ББУ-2
 Fig. 1. Fragment of the grid adjacent to the section of the Barnaul-Biysky node 2

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_A \times e^{j \arctg(\varphi)}, \quad (1)$$

где $\underline{U}_A$ – вектор напряжения на входе фазоповоротного устройства; $\underline{U}_{A1}$ – вектор напряжения на выходе фазоповоротного устройства; $\varphi = -\frac{2 \times \sqrt{3} \times n_1 \times n_2 \times k}{1 - 3 \times (n_1 \times n_2 \times k)^2}$ – угловой сдвиг; n_1 – коэффициент трансформации серийного трансформатора; n_2 – коэффициент трансформации шунтового трансформатора; $k = \pm 1$ – число, противоположное по знаку номеру ступени регулирования.

Применив формулу Эйлера, можно записать выражение связи входного и выходного напряжений (1) в следующем виде:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_A \times (k_t + jk_i), \quad (2)$$

где $k_t = \cos(\varphi)$ – действительная часть комплексного коэффициента трансформации; $k_i = \sin(\varphi)$ – мнимая часть комплексного коэф-

фициента трансформации.

Представление выходного напряжения от напряжения на входе устройства в виде (2) удобно для расчета в программе RastrWin3, где ФПТ моделируется с помощью вещественной и мнимой частей коэффициента трансформации.

Выбранный ФПТ с шунтовым и серийным трансформаторами номинальной мощностью 104 МВА осуществляет сдвиг по фазе за счет переключения отпаяк тиристорными коммутаторами. Устройство реализует сдвиг по фазе в диапазоне от -40° до $+40^\circ$ и содержит ± 15 отпаяк.

При расчете следует учитывать изменение суммарного сопротивления трансформатора при изменении номера отпаяки. Суммарное сопротивление трансформатора рассчитывается как сумма сопротивлений серийного и шунтового трансформаторов. Из каталожных данных сопротивление серийного трансформатора равно $X_{сер} = 6,67$ Ом. Со-



противление шунтового трансформатора $X_{шунт}$ приводится к напряжению серийного трансформатора и варьируется в зависимости от номера отпайки. В программном комплексе RastrWin3 сопротивление ФПТ прибавляется к сопротивлению линии электропередачи, в расщелку которой устанавливается устройство. В зависимости от номера отпайки суммарное сопротивление ФПТ изменяется от 6,73 Ом до 8,87 Ом в соответствии с табл. 1. Также в табл. 1 приведены расчетные значения коэффициентов трансформации.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ББУ-2 БЕЗ ФАЗОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Исследования данной работы можно считать продолжением исследований, проведенных в работе [15]. В указанной работе были определены максимально допустимые перетоки (МДП) в сечении ББУ-2 с использованием ФПТ, разработанного в Энергетическом научно-исследовательском институте им. Г.М. Кржижановского (в настоящее время Акционерное общество «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (АО «ЭНИН»)). Повышение МДП достигалось путем загрузки недогруженной линии электропередачи (ЛЭП) 220 кВ Барнаулская – Чесноковская. При этом суммарный переток ак-

тивной мощности по ВЛ 500 кВ Барнаулская – Рубцовская и Экибастузская-1150 – Алтай был направлен в Сибирь. Принципиальным отличием рассматриваемого исследования является учет режима сети, прилегающей к сечению, а также рассмотрение различных мест установки ФПТ при направлении суммарного перетока активной мощности в Казахстан.

Расчеты по определению МДП выполнялись в соответствии с методическими указаниями по расчету устойчивости энергосистем [20]. МДП получен с использованием RastrWin3, в котором производилось пошаговое утяжеление режима в соответствии с заданной траекторией.

В исследуемой энергосистеме увеличение перетока в сечении ББУ-2 производилось путем разгрузки в дефицитной части до технологического минимума Барнаулских и Бийской ТЭЦ, загрузки со стороны избыточной части сечения ТЭЦ АКХЗ, а также Кемеровских ТЭЦ, ГРЭС, Ново-Кемеровской ТЭЦ, Беловской ГРЭС, Южно-Кузбасской ГРЭС, Красноярской Берёзовской ГРЭС и Казахстанской Евроазиатской энергетической корпорации. Также осуществлялось уменьшение нагрузки в узлах вблизи ТЭЦ АКХЗ. Производилось регулирование отпайки автотрансформаторов Алтайской энергосистемы для получения максимально допустимого перетока.

Таблица 1. Результаты расчета сопротивлений и коэффициентов трансформации в зависимости от номера отпайки
Table 1. Results of calculating resistances and transformation ratios depending on the tap number

№ отп	$X_{шунт}$, Ом	$X_{сер}$, Ом	X_{Σ} , Ом	K_t	K_i	φ , °
±1	0,055	6,676	6,73	0,999	±0,0463	2,654
±2	0,147	6,676	6,82	0,996	±0,0924	5,304
±3	0,333	6,676	7,01	0,990	±0,1382	7,950
±4	0,320	6,676	7,00	0,983	±0,1836	10,586
±5	0,480	6,676	7,16	0,974	±0,2284	13,212
±6	0,708	6,676	7,38	0,962	±0,2725	15,823
±7	0,993	6,676	7,67	0,949	±0,3158	18,419
±8	1,216	6,676	7,89	0,934	±0,3581	20,995
±9	1,211	6,676	7,89	0,917	±0,3994	23,550
±10	1,269	6,676	7,95	0,898	±0,4394	26,082
±11	1,397	6,676	8,07	0,878	±0,4783	28,587
±12	1,683	6,676	8,36	0,857	±0,5158	31,066
±13	1,775	6,676	8,45	0,834	±0,5519	33,515
±14	1,965	6,676	8,64	0,810	±0,5866	35,933
±15	2,192	6,676	8,87	0,785	±0,6198	38,318

В работе рассматривались 3 основных режима:

- 1) нормальный;
- 2) с отключением ЛЭП 220 кВ ТЭЦ АКХЗ – Чесноковская с отпайкой на Шпагино (послеаварийный);
- 3) с отключением ЛЭП 220 кВ Барнаульская – Власиха (послеаварийный).

Согласно методическим указаниям по устойчивости³ [20], выделяют три основных фактора, ограничивающих МДП в сечении: нарушение требований по обеспечению коэффициента запаса по статической устойчивости для нормальной и послеаварийной схем, недопустимое снижение напряжения в узлах нагрузки, а также недопустимая перегрузка по току ЛЭП.

В рассмотренных режимах основным фактором, ограничивающим МДП, являлась токовая загрузка линий 110 кВ Чесноковская – Опорная с отпайкой на Береговую, Дмитротитовская – Кытмановская. При этом МДП определялся из известного соотношения:

$$P_M = P_{д/ав}(I_{п/ав}^{доп}) - \Delta P_{нк} + \Delta P_{ПА}, \quad (3)$$

где $I_{п/ав}^{доп}$ – аварийно допустимая токовая нагрузка ЛЭП; $P_{д/ав}(I_{п/ав}^{доп})$ – переток активной мощности в контролируемом сечении в доаварийной схеме, соответствующий аварийно допустимой токовой нагрузке ЛЭП; $\Delta P_{нк}$ – амплитуда нерегулярных колебаний активной мощности в контролируемом сечении; $\Delta P_{ПА}$ – приращение допустимого перетока активной мощности в контролируемом сечении за счет реализации управляющих воздействий от устройств противоаварийной автоматики (ПА).

В расчетах $\Delta P_{нк}$ принималась равной 25 МВт, действие ПА по повышению МДП не оценивалось.

Для повышения МДП предложен вариант с заменой проводов перегружаемых двухцепных ЛЭП 110 кВ Чесноковская – Опорная с отпайкой на Береговую и с установкой автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО) на ЛЭП 110 кВ ТЭЦ АКХЗ – Дмитротитовская с отпайкой на Камышенскую (рис. 1). Выполнялась замена проводов марки АС-240 на АС-300. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении ББУ-2 без применения фазоповоротного трансформатора, МВт

Table 2. Results of calculating maximum allowable flows in the Barnaul-Biysky node 2 section with an idle phase-shifting transformer, MW

Режим \ Схема	Исходная схема	Замена проводов на линии электропередачи Чесноковская – Опорная с установкой автоматики ограничения перегрузки оборудования на линии электропередачи теплоэлектроцентрали Алтайского коксохимического завода – Дмитротитовская	Повышение максимально допустимых перетоков, %
Нормальный	700	727	3,86
Послеаварийный (отключение линии электропередачи 220 кВ Чесноковская – теплоэлектроцентрали Алтайского коксохимического завода)	672	699	4,02
Послеаварийный (отключение линии электропередачи 220 кВ Барнаульская – Власиха)	696	722	3,74

³ Методические указания по устойчивости энергосистем [Электронный ресурс]. URL: <https://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/orders/pr630-030818me.pdf> (04.02.2021).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ББУ-2 С ФАЗОВОПОВОРОТНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

При исследованиях рассматривались два места установки ФПТ: в рассечку линии Барнаулская – Чесноковская или в рассечку линии Чесноковская – Троицкая. Определялись МДП при различных отпайках ФПТ. Расчеты

выполнялись путем установки на ФПТ определенной отпайки и последующего утяжеления режима по появления фактора, ограничивающего переток в сечении. Результаты исследований приведены на рис. 2–4 и в табл. 3. При номерах отпайки больше крайних, приведенных на соответствующих рисунках, наступала неустраняемая перегрузка по току линии, где установлен сам ФПТ.

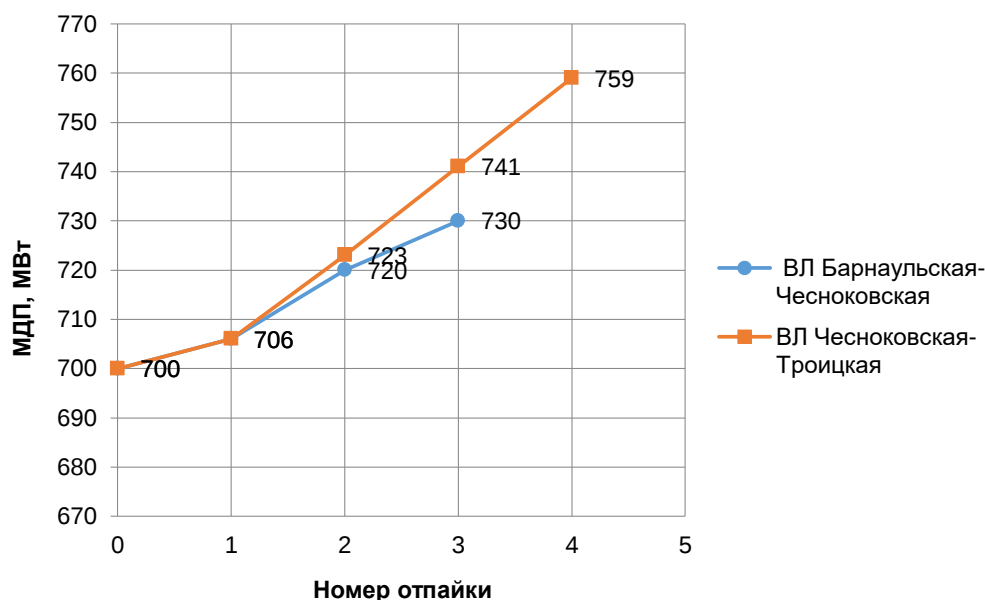


Рис. 2. Эффективность фазоповоротного трансформатора в нормальном режиме
Fig. 2. Efficiency of the phase-shifting transformer in the normal mode



Рис. 3. Эффективность фазоповоротного трансформатора в послеаварийном режиме (отключение линии Чесноковская – теплоэлектроцентрали Алтайского коксохимического завода)
Fig. 3. Efficiency of the phase-shifting transformer in the post-emergency mode (disconnected Chesnokovskaya – cogeneration plant of Altai Coke Plant line)

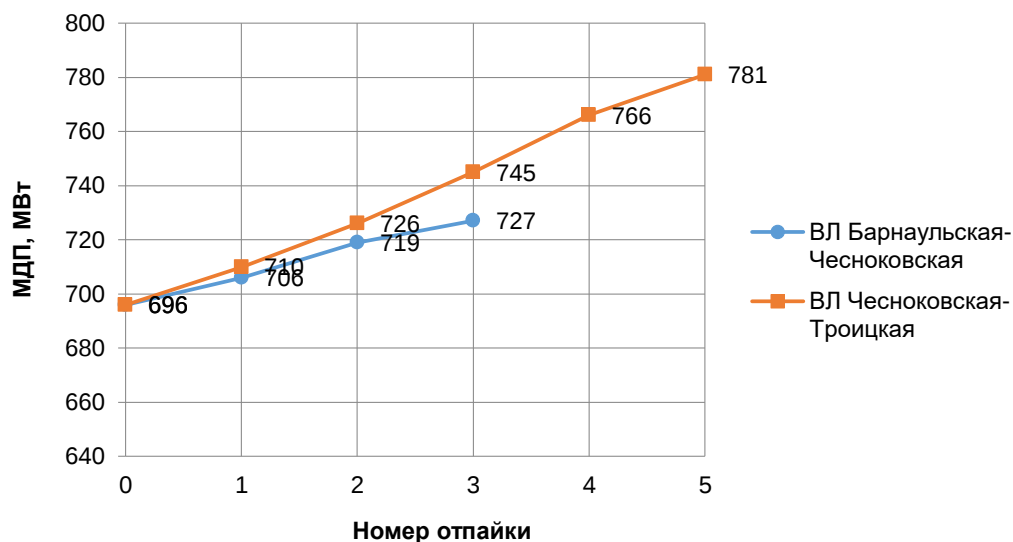


Рис. 4. Эффективность фазоповоротного трансформатора в послеаварийном режиме (отключение линии Барнаулская – Власиха)

Fig. 4. Efficiency of the phase-shifting transformer in the post-emergency mode (disconnected Barnaulskaya – Vlasikha line)

Таблица 3. Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении ББУ-2 с применением фазоповоротного трансформатора, МВт

Table 3. Results of calculating maximum allowable flows in the Barnaul-Biysky node 2 section using a phase-shifting transformer, MW

Режим Схема	Исходная схема	Фазоповоротный трансформатор в линии электропередачи 220 Барнаулская – Чесноковская	Повышение максимально допустимых перетоков, %	Фазоповоротный трансформатор в линии электропередачи 220 Чесноковская – Троицкая	Повышение максимально допустимых перетоков, %
Нормальный	700	730	4,29	759	8,43
Послеаварийный (отключение электропередачи Чесноковская – теплоэлектроцентрали Алтайского коксохимического завода)	672	702	4,46	751	11,76
Послеаварийный (отключение линии электропередачи Барнаулская – Власиха)	696	727	4,45	781	12,21

При установке ФПТ в рассечку линии 220 кВ Барнаулская – Чесноковская в нормальном и послеаварийном режимах при отключении ЛЭП 220 кВ Барнаулская – Власиха основным фактором, ограничивающим МДП, являлась токовая перегрузка линии 110 кВ Дмитротитовская – Кытмановская. В послеаварийном режиме при отключении ЛЭП 220 кВ ТЭЦ АКХЗ – Чесноковская дополнительно имела место перегрузка по току участка ЛЭП 220 кВ Смазнево – отпайка на Шпагино.

При установке ФПТ в рассечку линии 220

кВ Чесноковская – Троицкая в нормальном и послеаварийном режимах при отключении ЛЭП 220 кВ Барнаулская – Власиха основным фактором, ограничивающим МДП, являлась токовая перегрузка линий 110 кВ Чесноковская – Опорная с отпайкой на Береговую. В послеаварийном режиме при отключении ЛЭП 220 кВ ТЭЦ АКХЗ – Чесноковская МДП ограничивался токовой перегрузкой линии 110 кВ Дмитротитовская – Кытмановская и/или участка ЛЭП 220 кВ Смазнево – отпайка на Шпагино.



Наибольший эффект повышения МДП был получен при установке ФПТ с линии 220 кВ Чесноковская – Троицкая в послеаварийном режиме при отключении ЛЭП 220 кВ Барнаульская – Власиха. Это связано с тем, что ФПТ перераспределил мощность, отходящую от шин ПС 220 кВ Чесноковская, разгрузив перегружаемые линии 110 кВ Чесноковская – Опорная с отпайкой на Береговую и загрузив линию 220 кВ Чесноковская – Троицкая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Опыт разработки и эксплуатации ФПТ в зарубежных энергокомпаниях убедительно свидетельствует об их эффективности. В России данная инновационная технология впервые применена на Волжской ГЭС. По результатам опытной эксплуатации «Русгидро» на своих объектах и «Системный оператор» в сегментах ЕНЭС России планируют внедрение ФПТ, где их применение технологически и экономически целесообразно.

2. Проведенные исследования выявили одно из мест целесообразной установки ФПТ для повышения пропускной способности электропередачи – сечение Барнаульско-Бийского узла-2. Для рассматриваемого сечения применение ФПТ позволило увеличить МДП на 4–12%.

3. Выявлено, что определяющим фактором, ограничивающим МДП в сечении ББУ-2, является токовая перегрузка линий 110 кВ прилегающей сети. Причем наибольший эффект повышения МДП имел место при установке ФПТ не на линии 220 кВ, входящей в сечение, а на примыкающей к сечению линии 220 кВ, параллельной линиям 110 кВ, которые перегружались при утяжелении режима.

4. Предложен альтернативный вариант – замена проводов и установка АОПО на перегружаемых линиях 110 кВ. Для этого варианта выполнены аналогичные расчеты по определению МДП для нормальной и послеаварийных схем. Эффект повышения пропускной способности составил около 4%.

Список литературы

1. Холмский В.Г. Применение регулируемых трансформаторов. М.: Госэнергоиздат, 1950. 152 с.
2. Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф. Демпфирование колебаний перетоков мощности с помощью устройств FACTS с управляющими системами на основе модального синтеза // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2001. Вып. 3. С. 43–47.
3. Бушуев В.В., Калужный А.Х., Кречмер Л.В., Шушуев А.А. Применение фазоповоротных устройств для упрощения потокораспределения в энергосистемах // Электричество. 1990. № 11. С. 6–11.
4. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Режимы работы управляемых линий электропередачи // Электричество. 1997. № 9. С. 3–8.
5. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н., Гринштейн Б.И., Тузлукова Е.В. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Энергетик. 2010. № 8. С. 20–23.
6. Hingorani N.G., Gyugui L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999. 452 p. <https://doi.org/10.1002/9780470546802>
7. Мисриханов М.Ш., Рябченко В.К., Ситников В.Ф. Основы технологии FACTS // Электро-Info. 2007. № 12. С. 61–69.
8. Добрусин Л.А. Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России. Информационно-аналитический обзор. Часть III. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 60–66.
9. Евдокунин Г., Николаев Р., Исаков А., Оспанов Б., Утегулов Н. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане // Новости электротехники. 2008. № 6. С. 12–16.
10. Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Тузлукова Е.В., Хвоцинская З.Г., Злобина М.А., Иващенко Т.Е. Возможности применения фазоповоротных устройств в ЕНЭС России // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2005. Вып. 5. С. 42–44.
11. Акимов Д.А., Коровкин Н.В., Одинцов М.В., Фролов О.В. Методика выбора мест установки и параметров фазоповоротных трансформаторов в электрических сетях // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 74. С. 6–19.
12. Акимов Д.А., Гладышев О.Я., Борисов П.С. Усовершенствование методики выбора мест установки и углов регулирования фазоповоротных трансформаторов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 75. С. 67–74.
13. Wolfram M., Marten A.-K., Westermann D. A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer setting optimization // IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). 2016. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514056>
14. Воденников Д.А. Применение фазоповоротного

устройства для увеличения пропускной способности электрической сети // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 3. С. 75–80.

<https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>

15. Ставицкий С.А., Шестакова В.В. Применение фазоповоротного устройства в Алтайской энергосистеме // Интеллектуальные энергосистемы: тр. IV Междунар. молодёж. форума: в 3 т. (г. Томск, 10–14 октября 2016 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2016. Т. 2. С. 324–327.

16. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н., Гринштейн Б.И., Тузлукова Е.В. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Энергетик. 2010. № 8. С. 20–23.

17. Рашитов П.А., Ремизевич Т.В. Особенности управления полупроводниковым ФПУ со средней точкой // Силовая электроника. 2011. № 1. С. 78–82.

18. Панфилов Д.И., Рашитов П.А., Ремизевич Т.В., Федорова М.И. Расширение зоны управляемости полупроводниковых фазоповоротных устройств средствами алгоритмов управления тиристорным коммутатором // Динамика нелинейных дискретных электро-механических и электронных систем: матер. XI Всеросс. науч. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. С. 286–289.

19. Ахметов И.М., Лачугин В.Ф. Диагностика состояния фазоповоротного устройства с тиристорным коммутатором // Известия вузов. Электромеханика. 2015. № 1. С. 16–20. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2015-1-16-20>

20. Асташев М.Г., Панфилов Д.И. Фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами для активно-адаптивных электрических сетей // Электричество. 2013. № 8. С. 60–65.

References

1. Kholmsky VG. *The use of regulated transformers*. Moscow: Gosenergoizdat; 1950, 152 p. (In Russ.)

2. Misrihanov MSh, Ryabchenko VN, Sitnikov VF. Damping fluctuations in power flows using FACTS devices with control systems based on modal synthesis. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2001;3:43–47. (In Russ.)

3. Bushuev VV, Kalyuzhny AKh, Krechmer LV, Shushuev AA. Use of phase-shifting devices to simplify flow distribution in power systems. *Elektrichestvo*. 1990;11:6–11. (In Russ.)

4. Kochkin VI, Shakaryan YuG. Operating condition of controlled power transmission lines. *Elektrichestvo*. 1997;9:3–8. (In Russ.)

5. Stel'makov VN, Zhmurov VP, Tarasov AN, Grinshtein BI, Tuzlukova EV. Phase-shifting devices with thyristor control. *Energetik*. 2010;8:20–23. (In Russ.)

6. Hingorani NG, Gyugui L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1999, 452 p. <https://doi.org/10.1002/9780470546802>

7. Misrihanov MSh, Ryabchenko VK, Sitnikov VF. Fundamentals of FACTS technology. *Elektro-Info*. 2007;12:61–69. (In Russ.)

8. Dobrusin LA. Energy efficiency and energy saving problems in Russia. Information and analytical review. Part III. Application trends of phase-shifting transformers in electric power industry. *Silovaya elektronika*. 2012;4:60–66. (In Russ.)

9. Evdokunin G, Nikolaev R, Isakov A, Ospanov B, Utegulov N. Kazakhstan is the first in the CIS to use a phase-shifting transformer. *Novosti elektrotehniki*. 2008;6:12–16. (In Russ.)

10. Misrihanov MSh, Sitnikov VF, Tuzlukova EV, Hvoshchinskaya ZG, Zlobina MA, Ivashchenko TE. Possibilities to use phase-shifting devices in the Unified National All-Russian Grid. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2005;5:42–44. (In Russ.)

11. Akimov DA, Korovkin NV, Odintsov MV, Frolov OV. The method of choosing the placement and parameters of

phase-shifting transformers. *Izvestiya NTC edinoj energeticheskoy sistemi = STC of Unified Power System Proceedings*. 2016;74:6–19. (In Russ.)

12. Akimov DA, Gladyshev OY, Borisov PS. The phase-shifting transformers placement and settings choice method development. *Izvestiya NTC edinoj energeticheskoy sistemi = STC of Unified Power System Proceedings*. 2016;75:67–74. (In Russ.)

13. Wolfram M, Marten A-K, Westermann D. A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer setting optimization. In: *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514056>

14. Vodennikov DA. Application of a phase-shifting device for increasing the grid transmission capacity. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*. 2020;3:75–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>.

15. Stavickij SA, Shestakova VV. Application of a phase-shifting device in the Altai power system. *Intellektual'nye energosistemy: trudy IV Mezhdunarodnogo molodyozhnogo foruma = Intelligent power systems: Proceedings of IV International Youth Forum: in 3 volumes*. 10–14 October 2016, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2016, vol. 2, p. 324–327. (In Russ.)

16. Stel'makov VN, Zhmurov VP, Tarasov AN, Grinshtein BI, Tuzlukova EV. Thyristor- controlled phase-shifting devices. *Energetik*. 2010;8:20–23. (In Russ.)

17. Rashitov PA, Remizevich TV. Control features of semiconductor phase-shifting devices with a midpoint. *Silovaya elektronika*. 2011;1:78–82. (In Russ.)

18. Panfilov DI, Rashitov PA, Remizevich TV, Fedorova MI. Advancing the controllability zone of semiconductor phase-shifting devices by means of thyristor switch control algorithms. In: *Dinamika nelineynykh diskretnykh elektromekhanicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XI Vserossijskoj nauchnoj konferencii = Dynamics of nonlinear discrete electromechanical and electronic systems: Proceedings of XI All-Russian scientific conference*. Cheboksary: Chuvash University Publishing House. 2015, p. 286–289. (In Russ.)



19. Akhmetov IM, Lachugin VF. Diagnostics of phase-shifting device with thyristor switch. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika = Scientific and Technical Journal. Russian Electromechanics*. 2015;1:16–20. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17213/0136-3360-2015-1-16-20>
20. Astashev MG, Panfilov DI. Phase-shifting devices with thyristor switches for active-adaptive electrical networks. *Elektrichestvo*. 2013;8:60–65. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шойко Владимир Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Автоматизированные
электроэнергетические системы»,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия;
✉ e-mail: shoiko@ngs.ru

Духанина Ксения Владимировна,
магистрант,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия;
e-mail: duhanina.aksinja@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.04.2021; одобрена после рецензирования 28.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir P. Shoiko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Automated
Electric Power Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20 K. Marx Ave., Novosibirsk 630073, Russia,
✉ e-mail: shoiko@ngs.ru

Kseniya V. Dukhanina,
Master's Degree Student,
Novosibirsk State Technical University,
20 K. Marx Ave., Novosibirsk 630073, Russia,
e-mail: duhanina.aksinja@yandex.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 26.04.2021; approved after reviewing 28.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.

Анализ методов повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, используемых в металлургических и химических агрегатах

© Р.Ю. Фещенко, О.О. Ерохина, Р.Н. Еремин, Б.Э. Матыльский

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

Резюме: Цель – анализ и систематизация существующих методов повышения окислительной стойкости углеграфитовой продукции, а также оценка их применимости относительно металлургических и химических агрегатов. Обзор научных данных, описывающих механизм окисления углеграфитовых материалов, условий их применения в металлургических и химических процессах, а также существующих технологий по повышению окислительной стойкости искусственных графитов. Описаны существующие представления о кинетике окисления углеграфитов в зависимости от температурных режимов. Проведен обзор существующих технологий повышения окислительной стойкости материалов и их экономической эффективности с учетом условий их эксплуатации. Проанализированы перспективные варианты внедрения представленных решений для агрегатов металлургической и химической отраслей промышленности. Показано, что принципиально можно выделить три режима окисления графитированных материалов, которые определяются условиями эксплуатации, а также их химическими и физическими свойствами. С учетом этого может быть выбран наиболее рациональный метод повышения окислительной стойкости: пропитка с формированием защитного стеклообразного покрытия в объеме сквозных пор или при образовании покрытия – сплошного слоя на поверхности изделия за счет протекания химической реакции с используемыми реагентами. Для большинства металлургических и химических агрегатов более предпочтительной является пропитка углеграфитовых материалов с образованием боратных и фосфатных стекол, что обусловлено, в первую очередь, более низкими экономическими издержками. Применимость данного метода в настоящее время ограничивается температурными режимами, при которых сохраняются защитные свойства и сплошность сформированных стеклообразных покрытий. Поэтому для адаптации известных технологических и технических решений в этой области к высокотемпературным условиям металлургических агрегатов (свыше 800°C) необходимо добавить проведение дополнительных исследований.

Ключевые слова: углеграфитовые электроды, дуговые печи, окисление графита, пропитка, силицирование, стекловидные покрытия

Для цитирования: Фещенко Р.Ю., Ерохина О.О., Еремин Р.Н., Матыльский Б.Э. Анализ методов повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, используемых в металлургических и химических агрегатах. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 380–390. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-380-390>

Analysis of methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products used in metallurgical and chemical units

Roman Yu. Feshchenko, Olga O. Erokhina, Roman N. Eremin, Bronislav E. Matylskiy

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: This review study analyses the existing methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products, as well as assesses their applicability in metallurgical and chemical units. The research basis was the data published on the oxidation mechanism of carbon-graphite materials, conditions for their use in metallurgical and chemical processes, as well as existing technologies aimed at improving the oxidation resistance of artificial graphites. The existing ideas about the kinetics of carbon graphite oxidation are described depending on temperature conditions. A review of existing technologies for increasing the oxidation resistance of materials and their economic efficiency, taking into account the conditions of their operation, was carried out. Prospects of the presented solutions for the units of metallurgical and chemical industries were analysed. Three modes of oxidation of graphitised materials were distinguished on the basis of operating conditions, chemical and physical properties. According to this classification, the most rational method for increasing oxidation resistance consists in the impregnation of carbon-graphite materials with the formation of a protec-

tive glassy coating in the volume of through pores or with the formation of a coating (a continuous layer on the surface of the product) due to the occurrence of a chemical reaction with the reagents used. For most metallurgical and chemical units, the impregnation of carbon-graphite materials with the formation of borate and phosphate glasses is preferable, primarily due to lower economic costs. The applicability of this method is currently limited by temperature conditions, at which the protective properties and continuity of the formed glassy coatings are preserved. Therefore, additional research is required to adapt the conventional technological and technical solutions to the high-temperature conditions of metallurgical units (over 800°C).

Keywords: carbon-graphite electrodes, arc furnaces, graphite oxidation, impregnation, siliconizing, glass-like coatings

For citation: Feshchenko R.Yu., Erokhina O.O., Eremin R.N., Matylskiy B.E. Analysis of methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products used in metallurgical and chemical units. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):380–390. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-380-390>

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из искусственного графита имеют широкое применение в промышленности, что обусловлено свойствами данного материала, а именно – высокой тепло- и электропроводностью, а также химической стойкостью при удовлетворительных механических показателях [1–6]. Фактором, ограничивающим применение изделий из искусственного графита, является их низкая стойкость к окислению кислородом воздуха и некоторых других окислителей при повышенных температурах, что характерно для всех углеродсодержащих материалов.

Склонность к окислению обуславливает необходимость применения различных специфических технических решений, обеспечивающих снижение содержания окислителя в газовой фазе, например проведение процессов под вакуумом или в среде инертных газов. В ряде случаев отсутствует возможность создания регулируемой газовой атмосферы в технологическом агрегате, например при проведении плавки в дуговых и руднотермических печах, при получении магния и алюминия электролитическим способом; окисление изделий из углеграфитовых материалов является неизбежным фактором экономических издержек. Масштабность применения таких процессов обуславливает целесообразность поиска решений повышения устойчивости к высокотемпературному окислению как за счет направленного формирования специальной структуры углеграфитовых материалов посредством внесения изменений в технологический процесс их производства, так и за счет применения специальных решений по формированию защитных слоев.

МЕХАНИЗМ ОКИСЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ГРАФИТА

В процессе окисления углеграфитовых материалов могут быть выделены следующие стадии: диффузия окислителя вглубь образца, формирование углерод-оксидных связей и протекание непосредственно химической реакции, отвод продуктов окисления. В зависимости от температуры окисления каждая из этих стадий может определять скорость протекания процесса. Считается, что при низких температурах лимитирующей стадией является химическая реакция, при высоких – внешняя диффузия, а в интервале между ними – внутренняя [7, 8]. Пограничные температуры могут сильно меняться для различных сортов и видов углеграфитовых материалов, и для некоторых отраслей промышленности в настоящее время они не определены.

В низкотемпературном режиме, характерном для изделий, эксплуатируемых в ряде металлургических агрегатов (например, магниевых и алюминиевых электролизерах), окисление происходит в объеме графита, поскольку у молекул окислителя есть свободный доступ к активному объему пор. В режиме внутренней диффузии проникновение окислителя внутрь пор затруднено противотоком продуктов реакции. В режиме внешней диффузии окисление происходит только по поверхности изделия, что приводит к ее резкой и быстрой эрозии. Такой режим чаще всего характерен для углеграфитовых материалов, эксплуатируемых в ядерной энергетике и машиностроении.

Реакционная способность графита зависит от ряда факторов, в том числе размера кристаллитов, количества дефектов кристал-

лической решетки (рост числа которых упрощает формирование углерод-оксидных связей), количества поверхностных дефектов (трещин и пор), а также их глубины, развитости поверхности изделий [9–11] и степени графитизации. При низкой степени графитизации структура изделия имеет меньшую степень упорядоченности (с соответствующей турбостратификацией), что создает локальные очаги интенсивного окисления. При этом искусственные графиты с низкой степенью графитизации обладают повышенным межплоскостным расстоянием, что упрощает диффузию окислителя вглубь образца. Степень графитизации также имеет значительное влияние на температуру начала окисления и скорость данного процесса.

Существуют различные математические модели процессов окисления углеграфитов [10], однако они носят специфичный характер, и их применимость ограничивается условиями эксплуатации конкретных изделий. Это связано с варьированием параметров углеграфитовых материалов, определяемых особенностями изготовления (технологическими режимами, составами и др.), а также спецификой эксплуатации.

Приборные методы анализа также не являются универсальными для оценки скорости окисления углеграфитовых материалов, поскольку, например, термогравиметрический анализ обычно проводится на образцах, полученных путем прессования предварительного измельченного исходного материала, не отражая, таким образом, морфологию и свойства самого изделия [12–14]. Поэтому целесообразно скорость окисления оценивать на образцах представительного размера, как, например, это закреплено стандартом ISO для предварительно обожженных анодов алюминиевых электролизеров.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ГРАФИТА

Существует ряд различных методов повышения стойкости к окислению углеграфитовых материалов. Основой для рационального выбора метода защиты должно являться изучение кинетики окисления в каждом конкретном случае.

Классифицировать методы защиты можно по температурам эксплуатации (наиболее полно описаны изделия, применяемые при температурах до 900 и свыше 1500°C), способу нанесения (ручной, погружение в технологическую среду, осаждение из газовой фазы и т.д.), структуре образующегося защитного слоя (керамическая или стекловидная) и глубине его проникновения (создание защитного слоя на поверхности или сквозная пропитка изделия). Наиболее принципиальным различием с технологической точки зрения является последний фактор. Пропитка обеспечивает защиту по всему объему изделия, включая поверхность, а также сквозные каналы пор и трещины, поэтому скорость окисления для такого изделия по мере его изнашивания (уменьшения площади сечения) будет постоянной, при этом более низкой, чем для необработанного материала. Защитный слой обеспечивает более эффективное снижение скорости окисления, но при этом, в случае его механического повреждения, может произойти быстрое локальное разрушение.

ОБРАЗОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ

Для высокотемпературных условий эксплуатации в диапазоне свыше 1200°C широкое распространение получили керамические покрытия на поверхности изделий из синтетического графита [15], чаще всего на основе карбида кремния, которые позволяют в значительной степени увеличивать стойкость к окислению [16–19]. Формирование данных покрытий происходит за счет пропитки изделий жидким или газообразным кремнием при повышенных температурах (свыше 2000°C) без доступа кислорода. За счет химических реакций образуется поверхностный слой карбида кремния, характеризующийся высокой стойкостью к окислению, отличной электро- и теплопроводностью, а также хорошо выраженной твердостью. Полученное изделие может использоваться в окислительных условиях при температурах до 1600°C и выше [20, 21].

Наиболее простым способом создания покрытий на основе карбида кремния является использование расплавов кремния и со-

путствующих соединений. Силицирование углеграфитовых материалов включает несколько этапов [22–26], в том числе: смачивание образца жидким кремнием; инфильтрация кремния в поры под действием капиллярных сил, которая заканчивается при заполнении пор; образование карбида кремния. Предположительно образование карбида кремния происходит в несколько этапов: первичный, протекающий с высокой скоростью, и вторичный, протекание которого затруднено по причине замедленного диффундирования реагентов через слой первичного карбида кремния. Особенности протекания данного процесса определяют требования по пористости углеграфитового материала: в случае преобладания развитых узких пор глубина пропитки будет низкой вследствие их зарастания карбидом кремния. Критичным является радиус пор менее 1 мм [27].

Другим классическим способом силицирования графита является обработка графита газообразным кремнием, пример которой при температуре 1380°C описан в [28]. Заявленным результатом в работе явилось повышение окислительной стойкости при 1000°C, ее оценивали по величине потери массы при выдержке в изотермических условиях, которая составила 76%.

Для повышения защитных свойств карбидокремниевых покрытий могут быть использованы модифицирующие добавки, чаще всего тугоплавкие: такие, например, как оксид гафния, диборид (или фосфат) циркония, оксид алюминия, диборид циркония и др. Они обеспечивают стабильное повышение долгосрочной устойчивости к окислению при температурах до 1650°C, краткосрочной при 1900°C. Основными методами нанесения таких покрытий являются химическое осаждение из газовой фазы или ручное нанесение суспензий модифицирующих добавок с последующей двухстадийной термической обработкой. Так, например, в работе [29] предварительно дробили крупные компоненты сырьевой смеси, включающей 20–35% Si, 25–40% C, 2–4% SiB₄, 0,1–0,9% SiO₂, 1–3% HfO₂ и до 100% остальное – SiC, полученную смесь формовали прессованием при температуре 180–200°C и подвергали высоко-

температурной термообработке при 1650–1800°C. Результатом являлось повышение циклической термостойкости при температуре 1650°C. В работе [30] защитные покрытия, сформированные из различных смесей соединений диборида циркония, карбида кремния, фосфата циркония и фосфата кремния, и отвержденные в температурном диапазоне от 25 до 100°C, характеризовались долгосрочной устойчивостью при температурах от 1300 до 1600°C и краткосрочной (5 мин) при 1900°C. Формирование покрытий при совместном использовании газообразного азота и кремния при 1450–1650°C также благоприятно влияет на окислительную стойкость при совместном увеличении твердости слоя SiC в 10–15 раз [31]. Наибольшей длительной окислительной стойкостью характеризовались силицированные графиты при нанесении суспензий, содержащих 33 масс.% ZrB₂, 9 масс.% SiC, 8 масс.% TaSi₂, связующее – 1 масс.% поливинилбутираль и 49 масс.% этилового спирта с дальнейшей их термообработкой. Данные образцы способны выдерживать температуры свыше 1700°C [32, 33].

Пример экспериментального определения повышения устойчивости к окислению графитового изделия за счет формирования модифицированного покрытия из карбида кремния представлен на рис. 1.

ПРОПИТКА ОБРАЗЦОВ РАСТВОРАМИ СОЛЕЙ

Для повышения устойчивости к окислению углеграфитовых изделий, эксплуатируемых при температурах ниже 900°C (например, графитовые электроды, используемые в качестве анодов магниевых электролизеров с верхним вводом [34–36]) более целесообразным в сравнении с формированием керамического покрытия является применение пропитки растворами. Состав растворов подбирается таким образом, чтобы в ходе последующей термической обработки сформировать защитное стеклообразное покрытие на поверхности пор материала. Основными стеклообразующими компонентами являются соединения фосфора и бора.

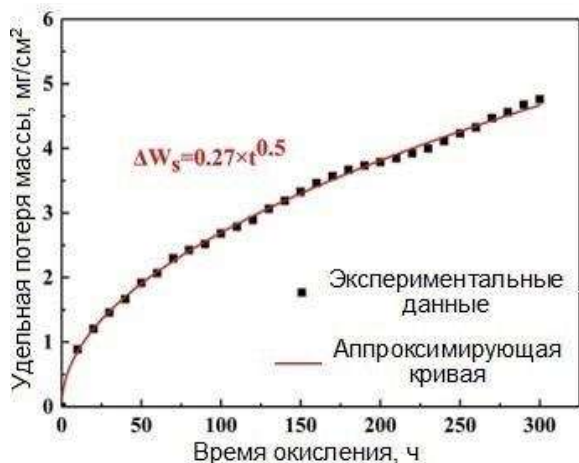


Рис. 1. Кинетика окисления образца при температуре 1500°C в течение 300 ч [33]

Fig. 1. Oxidation kinetics of a sample at the temperature of 1500°C for 300 hours [33]

Основанием для выбора раствора может являться его комплексный термический анализ (дифференциальная сканирующая калориметрия (от англ. differential scanning calorimetry DSC), совмещенная с термогравиметрией (от англ. thermogravimetry TG)), который позволяет определить температуру начала разрушения образующегося покрытия, ограничивающую температуру эксплуатации конечного продукта. Кроме того, по результатам комплексного термического анализа также можно подобрать условия термиче-

ской обработки изделия после пропитки, обеспечивающие полноту протекания реакций полимеризации и/или кристаллизации (рис. 2).

Механизм образования стекловидных покрытий включает разложение, дегидратацию, полимеризацию и кристаллизацию фосфатной/боратной составляющих пропиточных растворов при нагревании. Существенное влияние на термические превращения, происходящие в пропиточных растворах, оказывают введенные в них модифицирующие добавки. При этом отсутствует единый обоснованный подход к подбору оптимального пропиточного раствора. В качестве добавок могут быть использованы кальций, алюминий, калий, цинк, натрий и другие элементы. На текущий момент наибольшее распространение получили растворы, содержащие алюминий и его соединения (метафосфаты и гидроксиды).

Принципиально пропиточные составы можно наносить различными методами. Наиболее простым из описанных в литературных источниках является нанесение раствора кистью (например, смесь борной кислоты, растворимого стекла и SiO_2 [38]), однако подобные методы требуют последующей термообработки при относительно высоких

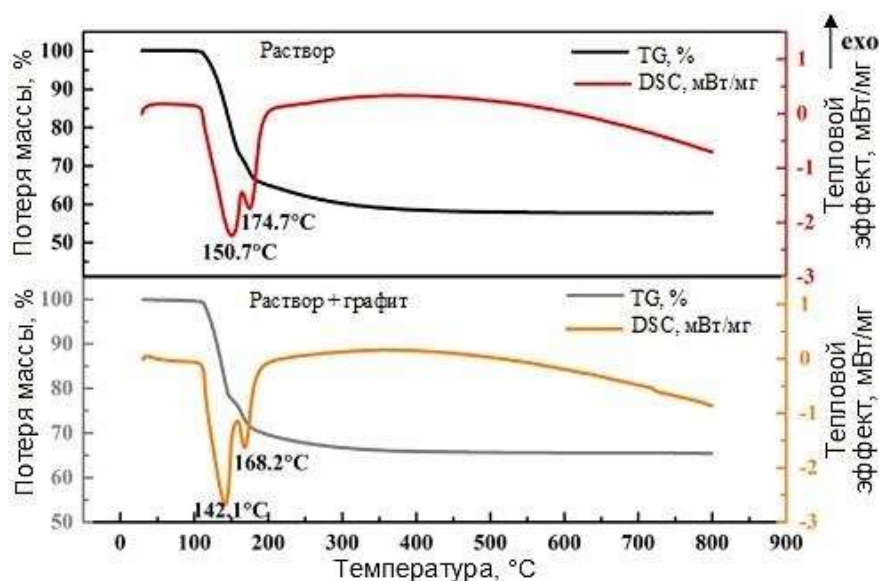


Рис. 2. Результаты комплексного термического анализа для пропиточного раствора и обработанного им порошкового графита [37]

Fig. 2. Results of an integrated thermal analysis for the impregnation solution and powdered graphite treated with it [37]

температурах (до 800°C), при этом глубина проникновения раствора будет невелика, а итогом является снижение скорости окисления графита при температуре не более 750°C. Более широкое применение получили методы пропитки непосредственным погружением в раствор, при этом существует зависимость между окислительной стойкостью конечного изделия и рядом параметров технологических процессов пропитки и последующей термообработки. Проникновение раствора в поры графита происходит за счет капиллярных сил, при этом целесообразно обрабатываемое изделие предварительно выдержать под разрежением для удаления газов из пор. Для изделий с большим поперечным сечением пропитку можно проводить под избыточным давлением для повышения глубины проникновения раствора.

В открытых источниках описано повышение окислительной стойкости графита при пропитке различными растворами. Так, например, пропитка графита погружением в раствор, состоящий из фосфорной кислоты, борной кислоты, дигидрофосфата алюминия, декагидрата тетрабората натрия и деионизированной воды в мольном соотношении 20:5:9:2:160, с дальнейшей термообработкой до 400°C позволяет получать изделия с повышенной окислительной стойкостью при температуре 500°C [37]. В то время как пропитка в вакууме три-трет-бутил боратом с последующим гидролизом, смешением порошковой борной кислоты, оксида бора или бората аммония и термообработкой при 500°C на воздухе позволяет сформировать покрытия, характеризующиеся повышением окислительной стойкости при температурах свыше 1000°C [39]. При пропитке под вакуумом электродного графита смесью дигидрофосфатов алюминия и цинка в лабораторных условиях обеспечено повышение устойчивости к окислению на модельных образцах в 4–5 раз [40].

Несмотря на множество различных составов, успешный опыт применения которых описан в открытых источниках, отсутствует сравнительный анализ полученных результатов в сопоставимых условиях, что значительно затрудняет подбор рационального пропи-

точного состава в зависимости от условий эксплуатации графита.

Пропитка углеграфитовых изделий в сравнении с формированием защитных покрытий проще с технологической точки зрения, осуществляется с применением более дешевых компонентов, а ее заключительная стадия – термообработка – производится при более низких температурах. Совокупность этих факторов способствует меньшим экономическим издержкам [38–40].

УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В слабоагрессивных окислительных средах вместо дополнительной обработки углеграфитовых изделий экономически может быть более обоснованным варьирование качественных характеристик самого материала. Решению целевой задачи – понижению реакционной способности поверхности изделий – может способствовать повышение упорядоченности структуры, а также уменьшение межплоскостного расстояния. Достичь этого можно за счет корректировки технологического режима процесса графитации. При этом необходимо учитывать негативное влияние повышения количества поверхностных дефектов, которому способствует увеличение температуры графитации [41, 42].

Также повышению стойкости к окислению может способствовать улучшение физических характеристик материалов (например, более низкая пористость и высокая плотность). Для достижения этого целесообразно применять комплексный подход, включающий как корректировку состава и качества сырьевых материалов, так и подбор оптимальных режимов технологических процессов. Наиболее очевидными решениями для снижения пористости изделий из искусственного графита является снижение содержания связующего и повышение глубины прокалики твердого углеродного наполнителя в шихтовой смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор рационального метода повышения окислительной стойкости углеграфитовых изделий в первую очередь связан с условия-

ми их дальнейшей эксплуатации. Так, силицирование является значительно более дорогостоящим методом, однако при этом обеспечивает возможность эксплуатировать графитовые изделия при температурах до 1600°C с сохранением структуры и свойств изделий.

Методы пропитки фосфатами и боратами получили широкое распространение для изделий, эксплуатация которых ведется до температур ниже 900°C. Формирование стеклообразных покрытий значительно дешевле, однако существуют нерешенные проблемы при их производстве, в том числе систематизация накопленного опыта для обоснования оптимального состава раствора и методов проведения пропитки, а также обеспечение

даже кратковременной стойкости к окислению при температурах свыше 1000°C. Предполагается, что свыше 600–700°C образовавшееся покрытие может начать возгораться, что также отрицательно влияет на его эффективность и безопасность условий труда при эксплуатации таких изделий.

По этим причинам задача получения устойчивых к высокотемпературному окислению изделий из синтетического графита является актуальной и нерешенной даже для таких крупномасштабных областей его применения, как дуговые сталеплавильные печи. Значимость этого направления возросла в последние годы в связи с резким подорожанием электродного графита на мировом рынке.

Список литературы

1. Fan Ling, Ma Ruifang, Zhang Qingfeng, Jia Xinxin, Lu Bingan. Graphite anode for a potassium ion battery with unprecedented performance // *Angewandte Chemie International Edition*. 2019. Vol. 58. Iss. 31. P. 10500–10505. <https://doi.org/10.1002/anie.201904258>
2. Bazhin V.Yu., Saitov A.V. Improvement of physical and performance characteristics of carbon graphite lining by lithium additives // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. No. 1. P. 48–53. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0181-9>
3. Nemchinova N.V., Yakushevich P.A., Yakovleva A.A., Gavrilenko L.V. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. Iss.1-2. P. 150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
4. Якушевич П.А., Немчинова Н.В., Гавриленко Л.В. Изучение технологических параметров получения углеродсодержащего продукта из техногенного сырья ОАО «РУСАЛ Братск» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. № 8. С. 161–168. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-8-161-168>
5. Сизяков В.М., Дубовиков О.А., Рис А.Д., Сундунов А.В. Роль термической активации при получении глинозема из низкокачественных бокситов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 1032–1041. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1032-1041>
6. Theodosiou A., Jones A.N., Burton D., Powell M., Rogers M., Livesey V.B. The complete oxidation of nuclear graphite waste via thermal treatment: an alternative to geological disposal // *Journal of Nuclear Materials*. 2018. Vol. 507. P. 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.002>
7. Theodosiou A., Jones A.N., Marsden B.J. Thermal oxidation of nuclear graphite: a large scale waste treatment option // *Plos one*. 2017. Vol. 12. No. 8. P. 0182860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182860>
8. Paul R.M. Application of a three-dimensional random pore model for thermal oxidation of synthetic graphite // *Journal of Nuclear Materials*. 2020. Vol. 543. P. 152589. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152589>
9. Muzyka R., Kwoka M., Smędowski Ł., Díez N., Gryglewicz G. Oxidation of graphite by different modified Hummers methods // *New Carbon Materials*. 2017. Vol. 32. Iss. 1. P. 15–20. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60102-1](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60102-1)
10. Smith R.E., Kane J.J., Windes W.E. Determining the acute oxidation behavior of several nuclear graphite grades // *Journal of Nuclear Materials*. 2021. Vol. 545. P. 152648. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152648>
11. Kondrasheva N.K., Ereemeeva A.M., Nelkenbaum K.S., Baulin O.A., Dubovikov O.A. Development of environmentally friendly diesel fuel // *Petroleum Science and Technology*. 2019. Vol. 37. No. 12. P. 1478–1484. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1594285>
12. Li Chang, Chen Xi, Shen Liming, Bao Ningzhong. Revisiting the oxidation of graphite: reaction mechanism, chemical stability, and structure self-regulation // *ACS omega*. 2020. Vol. 5. No. 7. P. 3397–3404. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03633>
13. Skákalová V., Kotrusz P., Jergel M., Susi T., Mittelberger A., Vretenár V. et al. Chemical oxidation of graphite: evolution of the structure and properties // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2018. Vol. 122. No. 1. P. 929–935. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10912>
14. Bystrov M.V., Yachikov I.M., Portnova I.V. Modelling of the thermal state and the melting loss of a graphite electrode in the conditions of the evaporative cooling in the arc furnace // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 966. No. 1. P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012019>

15. Behboudi F., Kakroudi M.G., Vafa N.P., Faraji M., Milani S.S. Molten salt synthesis of in-situ TiC coating on graphite flakes // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Iss. 6. P. 8161–8168. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.172>
16. Konno H., Kinomura T., Habazaki H., Aramata M. Formation of oxidation resistant graphite flakes by ultrathin silicone coating // *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 194. Iss. 1. P. 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.04.079>
17. Пат. № 2685654, Российская Федерация, C01B 32/21, C01B 32/956, C04B 35/532, C04B 35/565. Способ изготовления изделий из мелкозернистого силицированного графита / В.М. Бушуев, М.В. Бушуев; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов». Заявл. 10.01.2018; опубл. 22.04.2019. Бюл. № 12.
18. Пат. № 2685675, Российская Федерация, C01B 32/21, C01B 32/956, C04B 35/565, C04B 35/532. Способ изготовления изделий из ультрамелкозернистого силицированного графита / В.М. Бушуев, М.В. Бушуев; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов». Заявл. 20.12.2017; опубл. 22.04.2019. Бюл. № 12.
19. Fujii K., Nakano J., Shindo M. Improvement of the oxidation resistance of a graphite material by compositionally gradient SiC/C layer // *Journal of Nuclear Materials*. 1993. Vol. 203. Iss. 1. P. 10–16. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(93\)90424-W](https://doi.org/10.1016/0022-3115(93)90424-W)
20. Zhu Qingshan, Qiu Xueliang, Ma Changwen. Oxidation resistant SiC coating for graphite materials // *Carbon*. 1999. Vol. 37. Iss. 9. P. 1475–1484. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00010-X)
21. Wang Peipei, Li Hejun, Ren Xuanru, Yuan Ruimei, Hou Xianghui, Zhang Yulei. HfB₂-SiC-MoSi₂ oxidation resistance coating fabricated through in-situ synthesis for SiC coated C/C composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 722. P. 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.008>
22. Dezellus O., Jacques S., Hodaï F., Eustathopoulos N. Wetting and infiltration of carbon by liquid silicon // *Journal of Materials Science*. 2005. Vol. 40. No. 9-10. P. 2307–2311. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1950-7>
23. Shikunov S.L., Kurlov V.N. SiC-based composite materials obtained by siliconizing carbon matrices // *Technical Physics*. 2017. Vol. 62. No. 12. P. 1869–1876. <https://doi.org/10.1134/S1063784217120222>
24. Savchenko D.V., Serdan A.A., Morozov V.A., Van Tendeloo G., Ionov S.G. Improvement of the oxidation stability and the mechanical properties of flexible graphite foil by boron oxide impregnation // *New Carbon Materials*. 2012. Vol. 27. Iss. 1. C. 12–18. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(12\)60001-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(12)60001-8)
25. Бубненко И.А., Кошелев Ю.И., Орехов Т.В., Сорокин О.Ю. Разработка мелкозернистого силицированного графита с улучшенными свойствами // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2012. Т. 55. № 6. С. 12–16.
26. Ершов А.Е., Шикунев С.Л., Курлов В.Н. Метод расчета фазового состава SiC-Si-C-материалов, получаемых силицированием углеродных матриц // *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. Вып. 6. С. 888–895. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.06.44512.1913>
27. Кошелев Ю.И., Бубненко И.А., Швецов А.А., Бардин Н.Г., Сорокин О.Ю., Макаров Н.А. Силицированный графит: физико-химические основы получения и перспективы развития. Часть 3. Влияние тепловых эффектов и примесных элементов в кремнии и углеродном материале на процесс силицирования // *Техника и технология силикатов*. 2017. Т. 24. № 3. С. 11–15.
28. Chunhe Tang, Jie Guan. Improvement in oxidation resistance of the nuclear graphite by reaction-coated SiC coating // *Journal of Nuclear Materials*. 1995. Vol. 224. Iss. 1. P. 103–108. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(95\)00031-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(95)00031-3)
29. Пат. № 2392250, Российская Федерация, C04 35/577, C04B 35/80. Керамический композиционный материал / Д.В. Гращенков, Н.В. Исаева, С.С. Солнцев, Г.В. Ермакова; заявитель и патентообладатель Российская Федерация в лице Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России). Заявл. 29.04.2009; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17.
30. Patent no. 6632762, The United States of America, Int. Cl. C04B 35/565. Oxidation resistant coating for carbon / I.G. Talmy, K.J. Ashkenazi; The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. No. 09/987,493. Filed 15.11.2001; publ. 14.10.2003.
31. Patent no. 20100310860, The United States of America. Int. Cl. B32B 9/00, C23C 16/32, C23C 16/34. Synthetic method for anti-oxidation ceramic coatings on graphite substrates / J.U. Jung, S.W. Myoung, J.H. Kang, Kim Jeong-Pyo; Changwon National University Industry Academy Cooperation Corps. No. 12/745,276. Filed 28.02.2008; publ. 28.05.2010.
32. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Yuhai, Zuo Jun, Li Meishuan. Ultra-high temperature oxidation resistance of ZrB₂-20SiC coating with TaSi₂ addition on siliconized graphite // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Iss. 12. P. 15366–15374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.030>
33. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Jingjun, Jiang Yan, Zuo Jun, Li Meishuan. Oxidation and cracking/spallation resistance of ZrB₂-SiC-TaSi₂-Si coating on siliconized graphite at 1500°C in air // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Iss. 5. P. 6254–6261. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.095>
34. Liu Cheng-Lin, Zhao Qian-Wen, Sun Ze, Lu Gui-Min, Yu Jian-Guo. Analysis of magnesium droplets characteristics and separation performance in a magnesium electrolysis cell based on multiphysical modeling // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. Vol. 43. No. 11. P. 5965–5976. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3148-8>
35. Haarberg G.M. Trends and challenges for electrowinning of aluminium and magnesium from molten salt electrolytes // *TMS. 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. 2020. Cham: Springer,

2020. P. 1911–1922. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36296-6_176

36. Gorlanov E.S. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 1. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020. Vol. 24. No. 6. P. 1324–1336.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-00-00>

37. Lin Yingfei, Liu Tianlong, Wang Juan, Lu Jianing, Dong Xiaorong, Feng Xiaowei. Fabrication and oxidation resistance behavior of phosphate/borate impregnation for graphite // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 389. P. 125632.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125632>

38. Zeng Guisheng, Xie Gang, Yang Dajin, Wang Dajian, Zhang Xiongfei. Oxidation resistivity of boride coating of graphite anode sample // *Materials Chemistry and Physics*. 2006. Vol. 95. Iss. 1. P. 183–187.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.05.053>

39. McKee D.W. Borate treatment of carbon fibers and carbon/carbon composites for improved oxidation re-

sistance // *Carbon*. 1986. Vol. 24. Iss. 6. P. 737–741. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(86\)90183-1](https://doi.org/10.1016/0008-6223(86)90183-1)

40. Фещенко Р.Ю., Еремин Р.Н., Ерохина О.О., Дыдин В.М. Повышение окислительной стойкости графитированных блоков для электролитического производства магния методом пропитки фосфатными растворами. Часть 1 // *Цветные металлы*. 2020. № 10. С. 49–55. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.07>

41. De Tomas C., Suarez-Martinez I., Vallejos-Burgos F., Lopez M.J., Kaneko K., Marks N.A. Structural prediction of graphitization and porosity in carbide-derived carbons // *Carbon*. 2017. Vol. 119. P. 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.004>

42. Li Kejiang, Zhang Hang, Li Guangyue, Zhang Jianliang, Bouhadja M., Liu Zhengjian, et al. ReaxFF molecular dynamics simulation for the graphitization of amorphous carbon: a parametric study // *Journal of Chemical Theory and Computation*. 2018. Vol. 14. No. 5. P. 2322–2331. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.7b01296>

References

1. Fan Ling, Ma Ruifang, Zhang Qingfeng, Jia Xinxin, Lu Bingan. Graphite anode for a potassium ion battery with unprecedented performance. *Angewandte Chemie International Edition*. 2019;58(31):10500–10505. <https://doi.org/10.1002/anie.201904258>

2. Bazhin VYu, Saitov AV. Improvement of physical and performance characteristics of carbon graphite lining by lithium additives. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018;59(1):48–53. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0181-9>

3. Nemchinova NV, Yakushevich PA, Yakovleva AA, Gavrilenko LV. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting. *Metallurgist*. 2018;62(1-2):150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>

4. Yakushevich PA, Nemchinova NV, Gavrilenko LV. Study of technological parameters of obtaining carbon-containing product from technogenic raw materials of «RUSAL Bratsk» JSC. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;8:161–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-8-161-168>

5. Sizyakov VM, Dubovikov OA, Ris AD, Sundurov AV. Role of thermal activation in alumina production from low-quality bauxites. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(5):1032–1041. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1032-1041>

6. Theodosiou A, Jones AN, Burton D, Powell M, Rogers M, Livesey VB. The complete oxidation of nuclear graphite waste via thermal treatment: an alternative to geological disposal. *Journal of Nuclear Materials*. 2018;507:208–217. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.002>

7. Theodosiou A, Jones AN, Marsden BJ. Thermal oxidation of nuclear graphite: a large scale waste treatment option. *Plos one*. 2017;12(8):0182860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182860>

8. Paul RM. Application of a three-dimensional random pore model for thermal oxidation of synthetic graphite. *Journal of Nuclear Materials*. 2020;543:152589. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152589>

9. Muzyka R, Kwoka M, Smędowski Ł, Dzię N, Gryglewicz G. Oxidation of graphite by different modified Hummers methods. *New Carbon Materials*. 2017;32(1):15–20. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60102-1](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60102-1)

10. Smith RE, Kane JJ, Windes WE. Determining the acute oxidation behavior of several nuclear graphite grades. *Journal of Nuclear Materials*. 2021;545:152648. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152648>

11. Kondrasheva NK, Eremeeva AM, Nelkenbaum KS, Baulin OA, Dubovikov OA. Development of environmentally friendly diesel fuel. *Petroleum Science and Technology*. 2019;37(12):1478–1484. <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1594285>

12. Li Chang, Chen Xi, Shen Liming, Bao Ningzhong. Revisiting the oxidation of graphite: reaction mechanism, chemical stability, and structure self-regulation. *ACS omega*. 2020;5(7):3397–3404. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03633>

13. Skákalová V, Kotrusz P, Jergel M, Susi T, Mittelberger A, Vretenár V. et al. Chemical oxidation of graphite: evolution of the structure and properties. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2018;122(1):929–935. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10912>

14. Bystrov MV, Yachikov IM, Portnova IV. Modelling of the thermal state and the melting loss of a graphite electrode in the conditions of the evaporative cooling in the arc furnace. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;966(1):012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012019>

15. Behboudi F, Kakroudi MG, Vafa NP, Faraji M, Milani SS. Molten salt synthesis of in-situ TiC coating on graphite flakes. *Ceramics International*. 2021;47(6):8161–8168. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.172>

16. Konno H, Kinomura T, Habazaki H, Aramata M. Formation of oxidation resistant graphite flakes by ultrathin silicone coating. *Surface and Coatings Technology*. 2005;194(1):24–30.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.04.079>
17. Bushuev VM, Bushuev MV. Method for manufacturing products from fine-grained siliconized graphite. Patent RF, no. 2685654; 2019.
18. Bushuev VM, Bushuev MV. Method for manufacturing products from ultrafine-grained siliconized graphite. Patent RF, no. 2685675; 2019.
19. Fujii K, Nakano J, Shindo M. Improvement of the oxidation resistance of a graphite material by compositionally gradient SiC/C layer. *Journal of Nuclear Materials*. 1993;203(1):10–16.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(93\)90424-W](https://doi.org/10.1016/0022-3115(93)90424-W)
20. Zhu Qingshan, Qiu Xueliang, Ma Changwen. Oxidation resistant SiC coating for graphite materials. *Carbon*. 1999;37(9):1475–1484.
[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00010-X)
21. Wang Peipei, Li Hejun, Ren Xuanru, Yuan Ruimei, Hou Xianghui, Zhang Yulei. HfB₂-SiC-MoSi₂ oxidation resistance coating fabricated through in-situ synthesis for SiC coated C/C composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;722:69–76.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.008>
22. Dezellus O, Jacques S, Hodaj F, Eustathopoulos N. Wetting and infiltration of carbon by liquid silicon. *Journal of Materials Science*. 2005;40(9-10):2307–2311.
<https://doi.org/10.1007/s10853-005-1950-7>
23. Shikunov SL, Kurlov VN. SiC-based composite materials obtained by siliconizing carbon matrices. *Technical Physics*. 2017;62(12):1869–1876.
<https://doi.org/10.1134/S1063784217120222>
24. Savchenko DV, Serdan AA, Morozov VA, Van Tendeloo G, Ionov SG. Improvement of the oxidation stability and the mechanical properties of flexible graphite foil by boron oxide impregnation. *New Carbon Materials*. 2012;27(1):12–18.
[https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(12\)60001-8](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(12)60001-8)
25. Bubnenkov IA, Koshelev Yul, Orekhov TV, Sorokin OYu. Development of fine-grained siliconized graphite with improved properties. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = Transactions on Chemistry and Chemical Technology*. 2012;55(6):12–16. (In Russ.)
26. Ershov AE, Shikunov SL, Kurlov VN. Method of calculating the phase composition of SiC–Si–C materials obtained by silicon infiltration of carbon matrices. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2017;87(6):888–895. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21883/JTF.2017.06.44512.1913>
27. Koshelev Yul, Bubnenkov IA, Shvetsov AA, Bardin NG, Sorokin OYu, Makarov NA. Siliconized graphite: physico-chemical basis of production and development prospects. Part 3. The influence of thermal effects and impurity elements in the silicon and the carbon material on the process of siliconization. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov = Technique and Technology of Silicates*. 2017;24(3):11–15. (In Russ.)
28. Chunhe Tang, Jie Guan. Improvement in oxidation resistance of the nuclear graphite by reaction-coated SiC coating. *Journal of Nuclear Materials*. 1995;224(1):103–108.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(95\)00031-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(95)00031-3)
29. Grashchenkov DV, Isaeva NV, Solncev SS, Ermakova GV. *Ceramic composite material*. Patent RF, no. 2392250; 2010.
30. Talmy IG, Ashkenazi KJ. *Oxidation resistant coating for carbon*. Patent US, no. 6632762; 2003.
31. Jung JU, Myoung SW, Kang JH, Jeong-Pyo Kim. *Synthetic method for anti-oxidation ceramic coatings on graphite substrates*. Patent US, no. 20100310860; 2010.
32. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Yuhai, Zuo Jun, Li Meishuan. Ultra-high temperature oxidation resistance of ZrB₂-20SiC coating with TaSi₂ addition on siliconized graphite. *Ceramics International*. 2019;45(12):15366–15374.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.030>
33. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Jingjun, Jiang Yan, Zuo Jun, Li Meishuan. Oxidation and cracking/spallation resistance of ZrB₂-SiC-TaSi₂-Si coating on siliconized graphite at 1500°C in air. *Ceramics International*. 2020;46(5):6254–6261.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.095>
34. Liu Cheng-Lin, Zhao Qian-Wen, Sun Ze, Lu Gui-Min, Yu Jian-Guo. Analysis of magnesium droplets characteristics and separation performance in a magnesium electrolysis cell based on multiphysical modeling. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018;43(11):5965–5976.
<https://doi.org/10.1007/s13369-018-3148-8>
35. Haarberg GM. Trends and challenges for electrowinning of aluminium and magnesium from molten salt electrolytes. In: *TMS. 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. 2020. Cham: Springer; 2020, p. 1911–1922.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-36296-6_176
36. Gorlanov ES. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 1. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1324–1336.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1324-1336>
37. Lin Yingfei, Liu Tianlong, Wang Juan, Lu Jianning, Dong Xiaorong, Feng Xiaowei. Fabrication and oxidation resistance behavior of phosphate/borate impregnation for graphite. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125632.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125632>
38. Zeng Guisheng, Xie Gang, Yang Dajin, Wang Dajian, Zhang Xiongfei. Oxidation resistivity of boride coating of graphite anode sample. *Materials Chemistry and Physics*. 2006;95(1):183–187.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.05.053>
39. McKee DW. Borate treatment of carbon fibers and carbon/carbon composites for improved oxidation resistance. *Carbon*. 1986;24(6):737–741.
[https://doi.org/10.1016/0008-6223\(86\)90183-1](https://doi.org/10.1016/0008-6223(86)90183-1)
40. Feshchenko RYu, Eremin RN, Erokhina OO, Dydin VM. Phosphate solution wetting of graphite blocks for magnesium electrolysis to enhance their oxidation resistance. Part 1. *Tsvetnyye metally*. 2020;10:49–55.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.07>
41. De Tomas C, Suarez-Martinez I, Vallejos-Burgos F,



Lopez MJ, Kaneko K, Marks NA. Structural prediction of graphitization and porosity in carbide-derived carbons. *Carbon*. 2017;119:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.004>
42. Li Kejiang, Zhang Hang, Li Guangyue, Zhang

Jianliang, Bouhadja M, Liu Zhengjian, et al. ReaxFF molecular dynamics simulation for the graphitization of amorphous carbon: a parametric study. *Journal of Chemical Theory and Computation*. 2018;14(5):2322–2331. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.7b01296>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фещенко Роман Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
✉ e-mail: feschenko_ryu@pers.spmi.ru

Roman Yu. Feshchenko,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Metallurgy Department,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
✉ e-mail: feschenko_ryu@pers.spmi.ru

Ерохина Ольга Олеговна,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
e-mail: s205080@stud.spmi.ru

Olga O. Erokhina,
Postgraduate student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: s205080@stud.spmi.ru

Еремин Роман Николаевич,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
e-mail: s175081@stud.spmi.ru

Roman N. Eremin,
Postgraduate student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: s175081@stud.spmi.ru

Матыльский Бронислав Эдуардович,
магистрант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия;
e-mail: s202768@stud.spmi.ru

Bronislav E. Matyl'skiy,
Undergraduate student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: s202768@stud.spmi.ru

Заявленный 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 conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.04.2021; одобрена после рецензирования 27.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

Information about the article

The article was submitted 22.04.2021; approved after reviewing 27.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.

Исследование процессов сгущения продуктов обогащения золотосодержащих руд

© Д.А. Чернигов***, А.В. Богородский**, Р.Н. Набиулин**, Т.С. Минеева*

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

**Иркутский научно-исследовательский институт благородных
и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – совершенствование процесса сгущения флотационного концентрата ультратонкого помола в технологии переработки упорной сульфидной золотосодержащей руды одного из месторождений Южного Урала на основе использования эффективных флокулянтов. Химический состав руды изучен при помощи гравиметрического, атомно-абсорбционного, химического, рентгенофлуоресцентного, пробирного и микроанализа. Гранулометрический анализ флотоконцентрата, подвергнутого сверхтонкому измельчению, производился с помощью анализатора Malvern Hydro Mastersizer 2000MU (производства Malvern Panalytical Limited, Великобритания). В экспериментах по сгущению использовались пробы одинакового состава после технологического сверхтонкого измельчения. В результате аналитических исследований вещественного состава исследуемого материала установлено, что содержание золота в руде составляет 22,8 г/т. Достигнутая крупность основного класса продукта не менее 92% составляет -20 мкм. В результате проведенных лабораторных тестов, выполненных на восьми образцах флокулянтов на основе полиакриламида, был выявлен оптимально подходящий флокулянт марки А44 (производства Китайской Народной Республики). Данный флокулянт отвечает необходимым требованиям по показателям минимального расхода, скорости осаждения и отношению Ж:Т. На основе полученных данных была рассчитана и определена зависимость удельной производительности радиального сгустителя марки JX20 (производства JPMFex Corporate Limited, Китайская Народная Республика). Установлено, что оптимальный расход флокулянта составляет 200 г/т на 1 т сгущаемого материала, что способствует сгущению 50 т пульпы с 1 м² сгустителя в сутки. Вышеуказанный флокулянт А44 рекомендован для проведения опытно-промышленных испытаний. Таким образом, для интенсификации процесса обезвоживания руд после сверхтонкого измельчения необходимы разработка, опробование и внедрение принципиально новых реагентов и совершенствование существующих технологий переработки золотосодержащих руд и концентратов.

Ключевые слова: металлургия благородных металлов, сульфидная золотосодержащая руда, ультратонкое измельчение флотоконцентрата, сгущение, флокулянты

Для цитирования: Чернигов Д.А., Богородский А.В., Набиулин Р.Н., Минеева Т.С. Исследование процессов сгущения продуктов обогащения золотосодержащих руд. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 391–401. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-391-401>

Research into thickening processes of concentrates of gold-bearing ores

Dmitriy A. Chernigov***, Andrey V. Bogorodskiy**, Ruslan N. Nabiulin**, Tatiana S. Mineeva*

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim was to improve the thickening of an ultra-fine flotation concentrate by efficient flocculants when processing refractory sulphide gold-bearing ores from South Urals deposits. The chemical ore composition was studied using gravimetric, atomic absorption, chemical, X-ray fluorescent, assay test and electron microprobe analytical methods. Particle size analysis of the ultra-fine flotation concentrate under study was performed using a Malvern Hydro Mastersizer 2000MU analyser (Malvern Panalytical Ltd, UK). In thickening experiments, samples with the same composition after the ultra-fine grinding process were used. The gold content in the ore was determined (22.8 g/t) based on analytical studies on the material composition of samples. At least 92% of the final grain size class is -20 microns. Laboratory tests performed on eight samples containing polyacrylamide-based flocculants revealed an optimal A44 flocculant (produced in China). The flocculant meets the requirements for minimum flow rate, deposition rate and L:S ratio. The specific performance of the JX20 radial thickener (JPMFex Corp. Ltd., China) was calculated. The optimal flocculant flow rate is 200 g/t

per 1 t of thickened material, leading to thickening 50 t of pulp per 1 m² of thickener per day. The A44 flocculant is recommended for pilot testing. Thus, developing, testing and implementing fundamentally new reagents and improving existing technologies of processing gold-containing ores and concentrates are necessary to intensify the ore dewatering processes after ultra-fine grinding.

Keywords: metallurgy of precious metals, sulphide gold ore, ultrafine grinding of flotation concentrate, thickening, flocculants

For citation: Chernigov DA, Bogorodskiy AV, Nabiulin RN, Mineeva TS. Research into thickening processes of concentrates of gold-bearing ores. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):391–401. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-391-401>

ВВЕДЕНИЕ

Переработка руд благородных, редких и цветных металлов с применением методов обогащения и гидрометаллургических технологий является актуальным направлением современной металлургии [1–11].

Пристального внимания заслуживает наблюдающаяся в последние годы в золотодобывающей промышленности тенденция снижения доли простых в технологическом отношении руд, извлечение металла из которых обусловлено доступной формой. В связи с этим возникла необходимость вовлечения в переработку упорного золотосодержащего сырья, которое по своему вещественному составу является сложным. Золото присутствует в нем в состоянии субмикроскопической, тонкодисперсной вкрапленности в сульфидных минералах – его носителях. Для такого сырья неприемлемы традиционные подходы и необходима разработка принципиально новых и совершенствование существующих на сегодняшний день технологий.

В настоящее время выделяют ряд предложений и способов решения этой сложной технологической задачи. Одним из наиболее перспективных и востребованных из них является вскрытие тонковкрапленного золота путем сверхтонкого измельчения упорных сульфидных концентратов с последующим окислительным выщелачиванием под высоким давлением (данный способ выщелачивания называется автоклавным), это решение имеет определенную технологическую сложность. Получаемые тонкодисперсные пульпы в процессах гидрометаллургии осложняют

операции обезвоживания и разделения твердой и жидкой фаз ввиду того, что частицы тонкоизмельченного материала имеют очень малый вес и им трудно осаждаться в жидкостной структуре естественным путем, являющимся неотъемлемой частью гидрометаллургических технологий. Зачастую на золотоизвлекательных фабриках (ЗИФ) процесс сгущения является проблематичным действием, оказывающим влияние на показатели других переделов и технологии в целом, что может привести к снижению производительности оборудования, увеличению энергетических и тепловых затрат. Площадь, занятая сгустителями, составляет около 25% общей площади предприятия, а стоимость передела обезвоживания достигает 30% от общей стоимости переработки руд, что влияет на себестоимость продукции. Поэтому исследования, направленные на интенсификацию обезвоживания ультратонких пульп, представляются весьма актуальными¹. Данное исследование позволит снизить потери материала со сливами сгустителей, повысить извлечение металлов, увеличить производительность предприятия без установки дополнительного оборудования [12, 13].

Основным направлением оптимизации процессов сгущения является использование высокопроизводительных аппаратов, а также реагентов (для увеличения скорости осаждения твердой фазы), среди которых широко применяются в различных областях металлургии флокулянты [14–21].

Вследствие этого целесообразным явилось проведение лабораторных опытов для

¹Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов: учебник. В 2-х кн. Кн. 2. М.: ИД «Руда и металлы», 2005. 432 с.

оценки и подбора флокулянта с целью разработки рекомендаций применимости в технологическом процессе сгущения золотосодержащего флотоконцентрата после сверхтонкого измельчения.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ ФЛОТОКОНЦЕНТРАТА ПОСЛЕ СВЕРХТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Гранулометрический анализ исследуемого материала. Гранулометрический анализ состава исходного и ультратонкоизмельченного флотоконцентрата, произведенного на ЗИФ, выполняли на гранулометре Malvern Hydro Mastersizer 2000MU (Великобритания) (рис. 1).

Показано (табл. 1), что крупность частиц исходного флотоконцентрата до сверхтонкого состояния составляла не менее 98% класса минус 0,071 мм.

Отбор пульпы для выполнения анализа

образца флотоконцентрата после сверхтонкого измельчения проводили с использованием трех последовательно отобранных проб разгрузки мельницы, результаты гранулометрического анализа приведены в табл. 1.

Результаты гранулометрического анализа проб 1, 2 и 3, отобранных с места питания сгустителя в режиме реального времени на ЗИФ с использованием анализатора Malvern Hydro Mastersizer 2000MU, представлены ниже на рис. 2–4.

По технологической схеме ЗИФ в питание сгустителя перед автоклавным выщелачиванием поступает готовый продукт сверхтонкого измельчения крупностью частиц -20 мкм. Достигнутая крупность основного класса продукта классифицируется как тонкодисперсные материалы, которые в технологических процессах, без вовлечения в них реагентов, являются трудно поддающимися сгущению.



Рис. 1. Гранулометр Malvern Hydro Mastersizer 2000MU
Fig. 1. Malvern Hydro Mastersizer 2000MU analyser

Таблица 1. Гранулометрический состав флотоконцентрата золотоизвлекательной фабрики до и после измельчения

Table 1. Grain-size composition of gold recovery plant flotation concentrate before and after grinding

Классы крупности, мкм	Массовая доля минусового класса, %			
	исходный концентрат	1 проба измельчения	2 проба измельчения	3 проба измельчения
71	97,25	100	100	100
40	90,51	99,55	99,76	100
20	75,22	92,11	92,51	92,22
10	52,65	67,04	71,40	74,9
5	28,32	36,22	39,81	42,65
3	14,30	18,25	20,27	22,2

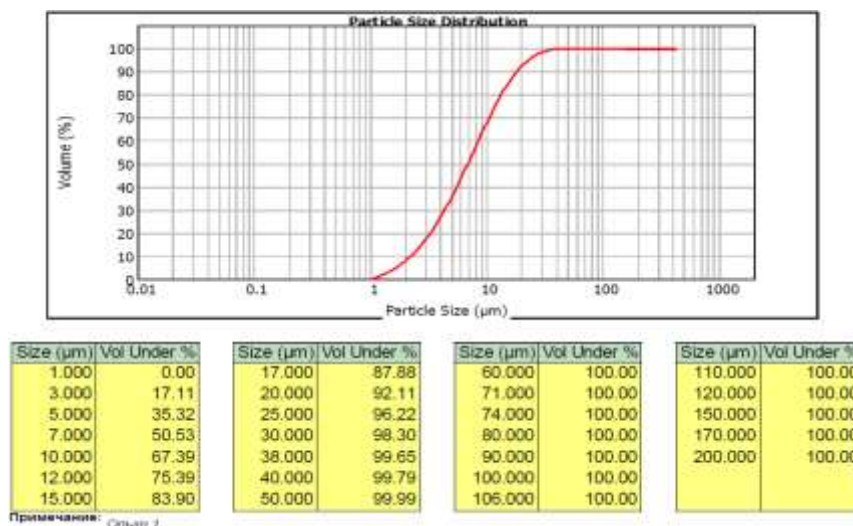


Рис. 2. Гранулометрический состав флотоконцентрата пробы № 1
Fig. 2. Grain-size composition of flotation concentrate of the sample no. 1

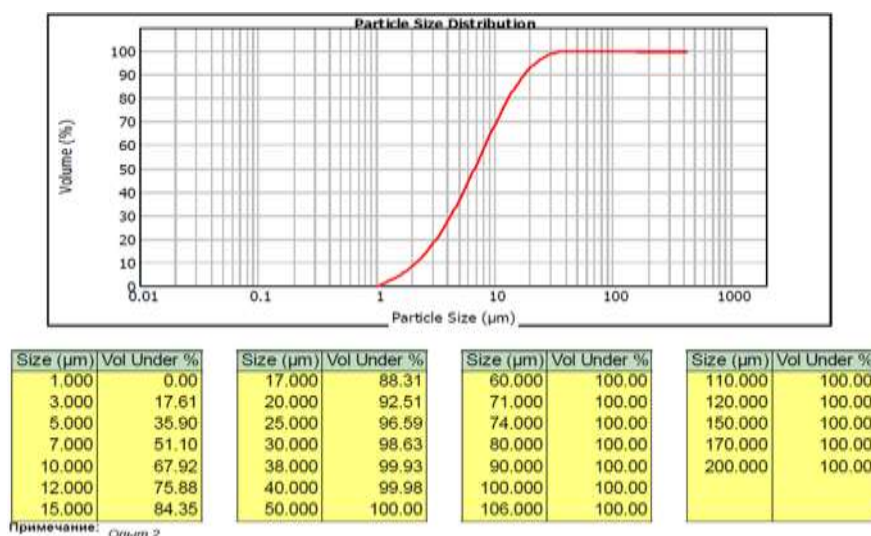


Рис. 3. Гранулометрический состав флотоконцентрата пробы № 2
Fig. 3. Grain-size composition of flotation concentrate of the sample no. 2

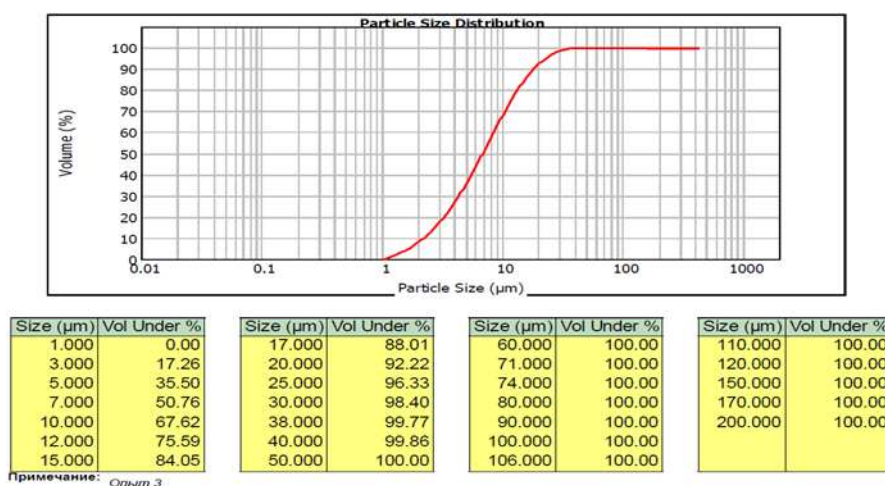


Рис. 4. Гранулометрический состав флотоконцентрата пробы № 3
Fig. 4. Grain-size composition of flotation concentrate of the sample no. 3

Вещественный состав флотоконцентрата. Объектом исследования являлся сульфидный флотоконцентрат текущей добычи руды одного из месторождений Южного Урала.

По результатам ситового анализа крупность флотоконцентрата составила 98% класса -0,071 мм.

Химический состав сульфидного золото-медного флотоконцентрата приведен в табл. 2.

На основании приведенного химического состава исследуемого флотоконцентрата проведен расчет его рационального состава, который приведен в табл. 3.

Таблица 2. Химический состав флотоконцентрата
Table 2. Chemical composition of flotation concentrate

Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %
SiO ₂	45,8	S _{общ}	14,0
Al ₂ O ₃	13,4	S _{окисл}	0,5
Na ₂ O ₃	1,5	S _{сульф}	13,8
K ₂ O	1,0	CO ₂	0,2
MgO	0,4	Cu	3,4
CaO	0,4	Zn	0,8
TiO ₂	0,3	As	1,1
P ₂ O ₃	0,05	Sb	0,3
MnO	0,03	Pb	0,1
Fe _{общ}	14,5	Au г/т	22,8
Fe _{окисл}	4,7	Ag г/т	31,2
Fe _{сульф}	9,8	н.о.*	н.о.

*н.о. – не обнаружено.

Подбор флокулянта для сгущения флотоконцентрата золотоизвлекательной фабрики после сверхтонкого измельчения и определение показателей сгущения. Исследования по сгущению и

расчет параметров данного процесса проводили согласно методике В.И. Зеленова [13].

В ходе исследований производился визуальный отбор флокулянтов, предназначенных для сгущения пульпы, с использованием мобильной установки с одновременной загрузкой до 5 реагентов за один цикл применения (разработка АО «Иргиредмет»), рис. 5, 6.

Для подбора наиболее эффективного флокулянта по скоростным характеристикам на исследуемом продукте испытаны следующие синтетические полимеры на основе полиакриламида: А44, А46, А48, А49, 231PVL, А414, А409, RH3842 (табл. 4).

Как следует из приведенных в табл. 3 результатов, визуальное тестирование по выбору флокулянта для сгущения флотоконцентрата сверхтонкого измельчения показало, что оптимальная скорость осаждения достигнута с применением флокулянта А44, в этом случае высота осветленного слоя в 2–3 раза выше, чем для остальных реагентов.

В связи с этим данный флокулянт (А44) был отобран для дальнейшего тестирования на определение оптимальной дозировки, табл. 5 (рис. 7).

На рис. 8 приведены кривые сгущения пульпы флотоконцентрата ультратонкого помола с расходом флокулянта 50, 100, 150, 200 и 300 г/т.

В табл. 6 приведены показатели сгущения, рассчитанные на основании данных рис. 8.

Зависимость удельной производительности сгущения от расхода флокулянта для сгущения флотоконцентрата приведена на рис. 9.

Таблица 3. Рациональный состав флотационного концентрата
Table 3. Rational composition of flotation concentrate

Компонент	Cu	Zn	Fe	S	As	Другие	Всего
Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃	2,80	–	–	1,53	1,10	–	5,43
CuFeS ₂	0,60	–	0,53	0,61	–	–	1,74
ZnS	–	0,80	–	0,40	–	–	1,20
FeS ₂	–	–	9,81	11,26	–	–	21,07
Другие	–	–	–	–	–	70,6	70,56
Всего	3,40	0,80	10,3	13,8	1,1	70,6	100,00

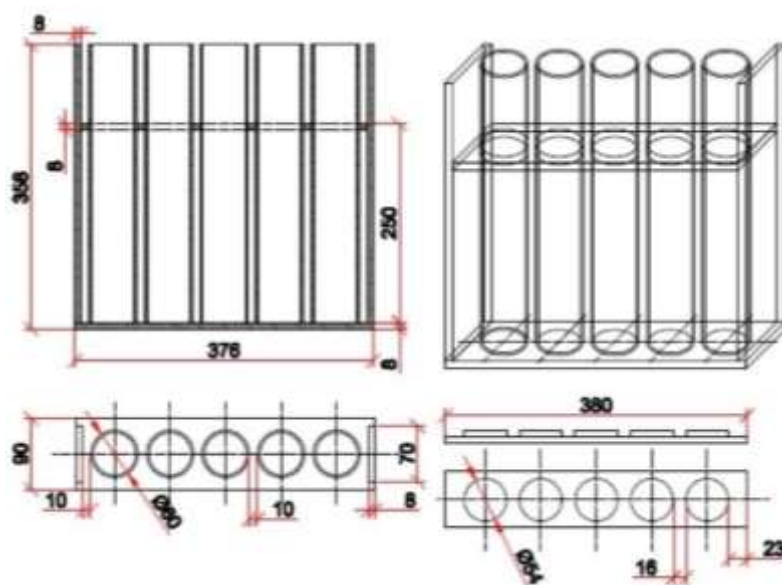


Рис. 5. Эскиз мобильной установки с одновременной загрузкой до пяти реагентов за один цикл применения
Fig. 5. A rough design of a portable installation with the simultaneous loading of up to five reagents in one application cycle



Рис. 6. Мобильная установка с одновременной загрузкой до пяти реагентов за один цикл применения
Fig. 6. Portable installation with simultaneous loading of up to five reagents in one application cycle

Таблица 4. Характеристика полиакриламидных флокулянтов
Table 4. Characteristics of polyacrylamide flocculants

Марка флокулянта	Степень ионизации, %	Содержание основного вещества, %	Нерастворимый остаток	Вязкость 1% раствора, сПз	Остаточный акриламид, мкг/г
A44	3	≥ 88,00	0,00–3,50	1500–4500	0–999
A46	3	≥ 88,50	0,00–3,50	1500–4500	0–999
A48	3	≥ 88,00	0,00–3,50	1500–4500	0–999
A49	3	≥ 88,00	0,00–3,50	2000–5000	0–999
A231PVL	3	≥ 87,00	0,00–3,50	2000–5000	0–999
A414	10	≥ 88,50	0,00–3,50	3000–6000	0–999
A409	10	≥ 88,00	0,00–3,50	3000–6000	0–499
RH3842	10	≥ 88,00	0,00–3,50	3000–6000	0–999

Таблица 5. Высота осветленного слоя при осаждении флотоконцентрата
Table 5. Height of the clarified layer under the deposition of flotation concentrate

Высота осветленного слоя, мм								
Время, мин	A44	A46	A48	A49	231 PVL	A414	A409	RH 3842
0,5	4	1	1	1	1	0	0	2
1	10	2	2	2	6	1	1	7
2	15	3	5	4	10	1	1	12
3	19	4	10	8	14	2	2	15
4	28	7	13	11	19	5	8	20
5	32	9	15	14	24	9	10	23
10	57	24	30	28	39	16	17	36



Рис. 7. Проведение подбора флокулянта в лабораторных цилиндрах по методике В.И. Зеленова
Fig. 7. Selection of flocculant in laboratory cylinders according to V.I. Zelenov's procedure

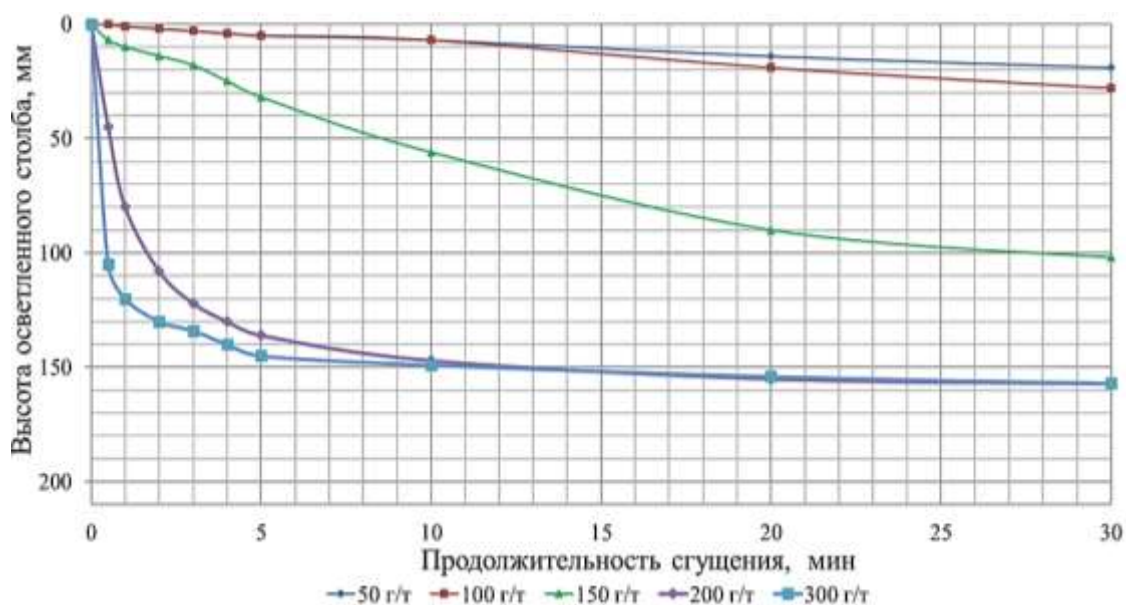


Рис. 8. Кривые сгущения флотоконцентрата тонкого помола с различной загрузкой флокулянта A44
Fig. 8. Curves of finely ground flotation concentrate thickening with different loading of flocculant A44

Таблица 6. Показатели сгущения флотоконцентрата при различном расходе флокулянта А44
Table 6. Indicators of flotation concentrate thickening at different consumption of flocculant A44

Дозировка флокулянта Yangfloc A44, г/т	Ж:Т в пульпе		Скорость осветления, м/ч	Удельная производительность сгущения, т/(м ² ·сут)	Чистота слива
	исходная	в зоне сжатия			
50	4	1,44	0,08	0,76	очень грязная
100		1,44	0,08	0,78	очень грязная
150		1,45	0,36	3,39	мутная
200		1,47	5,40	50,00	чистая
300		1,47	10,80	100,00	чистая

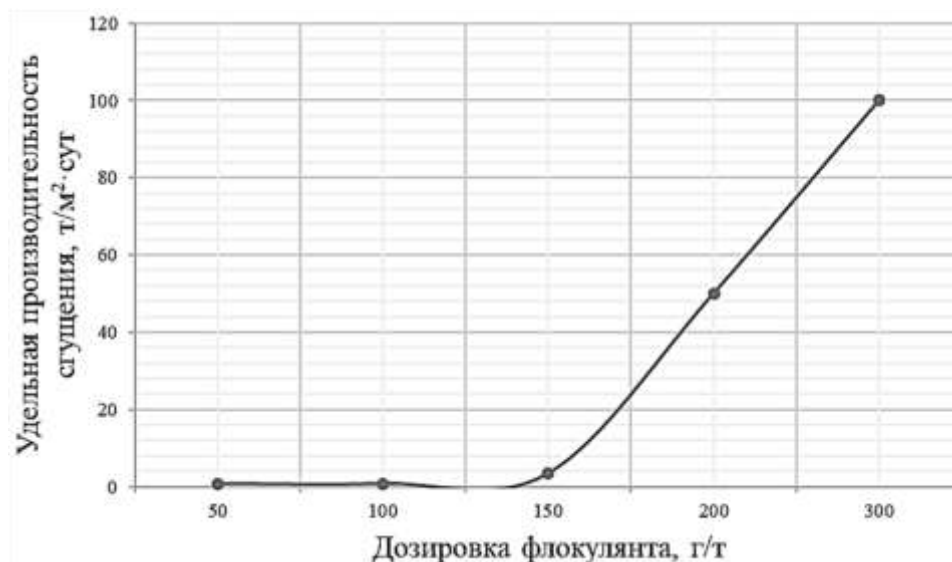


Рис. 9. Зависимость удельной производительности сгущения от расхода флокулянта
Fig. 9. Dependence of specific thickening performance on flocculant consumption

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных производственных данных и проб проведены лабораторные исследования по подбору флокулянта, произведены расчеты удельной производительности оборудования. Также в ходе исследования была определена зависимость удельной производительности сгустителя от дозировки реагента.

Установлено, что из числа рассмотренных

флокулянтов наилучшие показатели сгущения обеспечиваются при использовании анионного флокулянта марки А44 на основе полиакриламида. Также стоит отметить, что без применения флокулянта в промышленных масштабах процесс сгущения тонкоизмельченного флотоконцентрата не может быть возможным, для интенсификации процесса сгущения использование флокулянта является необходимой мерой.

Список литературы

1. Баликов С.В., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г. Плавка золотосодержащих концентратов. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2002. 368 с.
2. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – A review // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 115-116. P. 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>
3. Abbruzzese C., Fornari P., Massidda R., Veglio F., Ubaldini S. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy // Hydrometallurgy. 1995. Vol. 39. P. 265–276.
4. Willner J., Fornalczyk A., Cebulski J., Janiszewski K.

- Preliminary studies on simultaneous recovery of precious metals from different waste materials by pyrometallurgical method // Archives of Metallurgy and Materials. 2014. Vol. 59. Iss. 2. P. 801–804. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0136>
5. Черняк А.С. Химическое обогащение руд. М.: Недра, 1987. 224 с.
6. Василькова А.О., Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Оценка возможности переработки техногенного сырья с применением ультразвука

ких концентраций цианистого натрия. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 5. С. 1105–1112.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1105-1112>

7. Chanturya V.A., Bunin I.J., Lunin V.D. Nontraditional highly effective breaking up technology for resistant gold containing ores and beneficiation products // XXII International Mineral Processing Congress (Cape Town, 28 September – 3 October 2003). Cape Town, 2003. P. 135–139.

8. Hedjazi F., Monhemius A.J. Industrial application of ammonia-assisted cyanide leaching for copper-gold ores // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 126. P. 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.005>

9. Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э. Исследование двойного электрического слоя при сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1337–1346.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346>

10. Жмурова В.В., Немчинова Н.В., Васильев А.А. Гидрохимическая очистка от меди и свинца золотосодержащих катодных осадков // *Цветные металлы*. 2019. № 8. С. 64–74.

<https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

11. Жмурова В.В., Немчинова Н.В. Опыт комплексного использования золотосодержащего сырья при производстве драгоценных металлов // *Записки горного института*. 2018. Т. 233. С. 506–511.

<https://doi.org/10.31897/PMI.2018.5.506>

12. Ahmed H.A.M., El-Midany A.A. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria // *Materials Testing – Materials and Components Technology and Application*. 2012. Vol. 54. Iss. 5. P. 351–357. <https://doi.org/10.3139/120.110339>

13. Зеленов В.И. Методика исследования золотосодержащих руд. М.: Недра, 1973. 227 с.

14. Сизяков В.М., Иваник С.А., Фокина С.Б. Исследо-

вание процессов сгущения и фильтрации тонкодисперсных окисленных пульп // *Обогащение руд*. 2012. № 2. С. 24–28.

15. Peng Yunyan, Jin Dong, Li Jingmiao, Wang Chunfeng. Flocculation of mineral processing wastewater with Polyacrylamide // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 565. P. 012101.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012101>

16. Liu Wen-li, Hu Yue-hua, Sun Wei. Separation of diaspore from bauxite by selective flocculation using hydrolyzed polyacrylamide // *Journal of Central South University*. 2014. Vol. 21. P. 1470–1476.

<https://doi.org/10.1007/s11771-014-2087-0>

17. Yu Baoqiang, Che Xiaokui, Zheng Qi. Flotation of ultra-fine rare earth minerals with selective flocculant PHDA // *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 60. P. 23–25. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.027>

18. Yu M., Mei G., Li Y., Liu D., Peng Y. Recovering rare earths from waste phosphors using froth flotation and selective flocculation // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2017. Vol. 34. No. 4. P. 161–169.

<https://doi.org/10.19150/mmp.7855>

19. Неизвестных Н.Н., Богданов А.В., Мячин А.В., Федотов К.В. Исследование процесса сгущения пульпы при переработке руд месторождений Биркачан и Цоколь // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 6. С. 147–151.

20. Tyutrin A.A., Vologin A.S. Analysis of the Composition and Properties of the Silicon Production Wet Cleaning Sludge to Identify Sustainable Techniques for its Processing // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 649–654. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.649>

21. Ivanik S.A., Ilyukhin D.A. Hydrometallurgical technology for gold recovery from refractory gold-bearing raw materials and the solution to problems of subsequent dehydration processes // *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017. Vol. 33. No. 1. P. 891–897.

References

1. Balikov SV, Dement'ev VE, Mineev GG. *Smelting of gold concentrates*. Irkutsk: IrGiredmet; 2002, 368 p. (In Russ.)

2. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – A review. *Hydrometallurgy*. 2012;115-116:30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>

3. Abbruzzese C, Fornari P, Massidda R, Veglio F, Ubaldini S. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 1995;39:265–276.

4. Willner J, Fornalczyk A, Cebulski J, Janiszewski K. Preliminary studies on simultaneous recovery of precious metals from different waste materials by pyrometallurgical method. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014;59(2):801–804. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0136>

5. Chernyak AS. *Chemical concentration of ores*. Moscow: Nedra; 1987, 224 p. (In Russ.)

6. Vasilkova AO, Byval'tsev AV, Khmel'nitskaya OD, Voiloshnikov GI. Assessing possibility of technogenic raw material processing using ultra-low concentrations of so-

dium cyanide. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5): 1105–1112. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1105-1112>

7. Chanturya VA, Bunin IJ, Lunin VD. Nontraditional highly effective breaking up technology for resistant gold containing ores and beneficiation products. In: *XXII International Mineral Processing Congress*. 28 September – 3 October 2003, Cape Town. Cape Town; 2003, p. 135–139.

8. Hedjazi F, Monhemius AJ. Industrial application of ammonia-assisted cyanide leaching for copper-gold ores. *Minerals Engineering*. 2018;126:123–129. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.005>

9. Elshin VV, Golodkov YuE. Studying electric double layer under sorption of gold on activated carbons from thiocarbamide solutions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1337–1346. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346>

10. Zhmurova V.V., Nemchinova N.V., Vasiliev A.A.

Removal of copper and lead from gold-bearing cathode deposits by hydrochemical treatment. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:67–74. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

11. Zhmurova VV, Nemchinova N V. The practice of comprehensive utilisation of gold-bearing materials in the precious metals industry. *Zapiski Gornogo instituta*. 2018; 233:506–511. <https://doi.org/10.31897/PMI.2018.5.506>

12. Ahmed HAM, El-Midany AA. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria. *Materials Testing – Materials and Components Technology and Application*. 2012;54(5):351–357. <https://doi.org/10.3139/120.110339>

13. Zelenov VI. Research methodology for gold-bearing ores. Moscow: Nedra; 1973, 227 p. (In Russ.)

14. Sizyakov VM, Ivanik SA, Fokina SB. Fine-dispersed oxidized pulps thickening and filtration processes study. *Obogashchenie rud*. 2012;2:24–28. (In Russ.)

15. Peng Yunyan, Jin Dong, Li Jingmiao, Wang Chunfeng. Flocculation of mineral processing wastewater with polyacrylamide. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;565:012101. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012101>

16. Liu Wen-li, Hu Yue-hua, Sun Wei. Separation of diaspore from bauxite by selective flocculation using hydrolyzed polyacrylamide // *Journal of Central South University*.

2014;21:1470–1476. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2087-0>

17. Yu Baoqiang, Che Xiaokui, Zheng Qi. Flotation of ultra-fine rare earth minerals with selective flocculant PHDA. *Minerals Engineering*. 2014;60:23–25. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.027>

18. Yu M, Mei G, Li Y, Liu D, Peng Y. Recovering rare earths from waste phosphors using froth flotation and selective flocculation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2017;34(4):161–169. <https://doi.org/10.19150/mmp.7855>

19. Neizvestnykh NN, Bogdanov AV, Myachin AV, Fedotov KV. Studying ore pulp thickening of "Birkachan" and "Tsokol" gold-silver deposits. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;6:147–151. (In Russ.)

20. Tyutrin AA, Vologin AS. Analysis of the Composition and Properties of the Silicon Production Wet Cleaning Sludge to Identify Sustainable Techniques for its Processing // *Solid State Phenomena*. 2021;316:649–654. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.649>

21. Ivanik SA, Ilyukhin DA. Hydrometallurgical technology for gold recovery from refractory gold-bearing raw materials and the solution to problems of subsequent dehydration processes. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017;33(1):891–897.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чернигов Дмитрий Александрович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
старший инженер Инженерно-Коммерческого центра,
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
✉ e-mail: dchernigov@mail.ru

Богородский Андрей Владимирович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории
металлургии,
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
e-mail: bav@irgiredmet.ru

Набиулин Руслан Нурлович,
научный сотрудник Лаборатории металлургии,
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
e-mail: r_nabiulin@irgiredmet.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy A. Chernigov,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Senior Engineer of the Engineering and Commercial
Centre,
JSC Irgiredmet,
38 Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia;
✉ e-mail: dchernigov@mail.ru

Andrey V. Bogorodskiy,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Metallurgy Laboratory,
JSC Irgiredmet,
38 Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia;
e-mail: bav@irgiredmet.ru

Ruslan N. Nabiulin,
Researcher of the Metallurgy Laboratory,
JSC Irgiredmet,
38 Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia;
e-mail: lab15@irgiredmet.ru



Минеева Татьяна Султановна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: _ksu_@inbox.ru

Tatiana S. Mineeva,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Non-Ferrous Metals
Department,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: _ksu_@inbox.ru

Заявленный вклад авторов

Чернигов Д.А., Богородский А.В., Набиулин Р.Н. – проведение экспериментов и обработка данных; Минеева Т.С. – научное руководство, концепция исследований.

Contribution of the authors

Chernigov D.A., Bogorodskiy A.V., Nabiulin R.N. conducted experiments and processed data. Mineeva T.S. was responsible for the scientific supervision and research concept.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.04.2021; одобрена после рецензирования 29.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

Information about the article

The article was submitted 23.04.2021; approved after reviewing 29.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.

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: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с **приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах)**;
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 3 (158) 2021

12+

Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный секретарь Г.П. Привалова
Перевод на английский язык Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.06.2021 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 16.
Тираж 500 экз. Заказ 120. Поз. плана 3н.

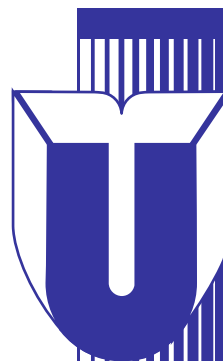
Издание распространяется **бесплатно**

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

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2021

