

Том 25 № 2
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 № 2

2021

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 25 № 2

2021

Редакционная коллегия

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: pgr@istu.edu

КОРНЯКОВ М.В., д.т.н., ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)
НЕМЧИНОВА Н.В., д.т.н., профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)
БАЖИН В.Ю., д.т.н., декан факультета переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)
БАЛИКОВ С.В., д.т.н., главный научный сотрудник Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов (г. Иркутск, Россия)
БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю., д.т.н., профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия)
БОЛДЫРЕВ А.И., д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия)
БОРОВИКОВ Ю.С., д.т.н., и.о. ректора Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)
ВОРОПАЙ Н.И., член-корреспондент РАН, научный руководитель Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
ГАВЛИК ЮЗЕФ, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (г. Краков, Польша)
ГАЛЕВСКИЙ Г.В., д.т.н., заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии Сибирского государственного индустриального университета (г. Новокузнецк, Россия)
ДАМБИЕВ Ц.Ц., д.т.н., профессор Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ, Россия)
ЗАЙДЕС С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)
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)
МАМАЧЕНКОВ 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)
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)
СУСЛОВ К.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)
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)
ФИШОВ А.Г., д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)
ХЕЙФЕЦ М.Л., д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)
ШОЛЬТЕС Бертольд, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta

Vol. 25 No. 2

2021

Publishers of Irkutsk National
Research Technical University

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

Editorial board

KORNYAKOV M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)

NEMCHINOVAN.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)

BAZHIN V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)

BALIKOV S.V., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of Irkutsk Scientific Research Institute of Noble and Rare Metals and Diamonds (Irkutsk, Russia)

BLUMENSTEIN V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Professor of Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)

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

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

VOROPAI N.I., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)

GAVLIK U., Professor of the Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)

GALEVSKY G.V., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Nonferrous Metallurgy and Chemical Technology of the Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)

DAMBEV Ts.TS., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the East Siberian State University of Technology and Management (Ulan-Ude, Russia)

ZAIDE S.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

ZAKARYUKIN V.P., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Transport Electricity of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)

KARPENKO E.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies of the Institute of Physical Materials Science of the SB RAS (Ulan-Ude, Russia)

KLER A.M., Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)

KOLOSOK I.N., Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)

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

KURBATSKY V.G., Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)

MAMYACHENKOV S.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

MATLIN M.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)

NOVITSKY N.N., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)

OGAR P.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor of Bratsk State University (Bratsk, Russia)

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

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

SENDEROV S.M., Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)

STENNIKOV V.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)

STYCZYNSKI S.A., Professor of the Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)

SUSLOV K.V., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

TYURINA E.A., Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)

FANGLIU, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)

FEDYAEV A.A., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering of Bratsk State University (Bratsk, Russia)

FISHOV A.G., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)

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

SCHOLTES B., Director of the Institute of Metal Science of the University of Kassel (Kassel, Germany)

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 25 № 2

2021

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	144
------------------	-----

Машиностроение и машиноведение

 Пятовский А.С., Бройдо В.Л. Разработка сварной конструкции и технологии изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи.....	148
 Саблин П.А., Щетинин В.С. Многофакторное влияние на качество обработки резанием.....	161

Энергетика

 Глазунова А.М., Колосок И.Н. Влияние весовых коэффициентов измерений на согласованность результатов оценивания состояния и расчета установившегося режима электроэнергетической системы.....	172
 Забуга Ф.В., Алексеюк В.Э. Исследования на основе математического моделирования энергоблока №5 ТЭЦ-10 ООО «Байкальская энергетическая компания» для оценки эффективности его модернизации.....	183
 Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Биккулов Р.Я., Мадышев И.Н. Оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц в сепараторе с соосно расположенными трубами.....	196
 Мехряков А.Д., Кудряшов А.Н., Коваль Т.В. Повышение эффективности использования отходов тепловых электрических станций путем увеличения производительности работы установки по отпуску сухой золы.....	207
 Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Рудник В.Е., Гусев А.С. Оценка влияния ветроэлектростанций на изменение суммарной инерции электроэнергетической системы.....	220

Металлургия и материаловедение

 Горланов Е.С., Поляков А.А. К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 3. Распределение электрического поля на электродах.....	235
 Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевое производства для поиска путей их рациональной переработки.....	252
 Халифа А.А., Бажин В.Ю., Шалаби М.Э.-М.Х., Абдельмонеим А., Омран М. Повышение эффективности карботермического восстановления красного шлама при обработке микроволнами.....	264

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta

Vol. 25 No. 2

2021

CONTENTS

Contents.....	145
---------------	-----



Mechanical Engineering and Machine Science



 Pyatovsky A.S., Broido V.L. Development of a welded structure and a technology for manufacturing a smoke valve casing ID 2000 for use in a blast furnace.....	148
 Sablin P.A., Shchetinin V.S. Multi-factor influence on the roughness of the finished surface.....	161



Power Engineering



 Glazunova A.M., Kolosok I.N. Influence of the weight coefficients of measurements on the consistency of the assessment and calculation results of the power supply system steady-state operation conditions.....	172
 Zabuga F.V., Alekseyuk V.E. Mathematical modelling of the CHP plant-10 power unit No 5 of "Baikal energy company" LLC to assess the efficiency of its modernization.....	183
 Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R., Bikkulov R.Ya., Madyshev I.N. Estimation of power consumption when trapping finely-dispersed particles in a separator with coaxially-arranged pipes.....	196
 Mekhryakov A.D., Kudryashov A.N., Koval T.V. Improving the waste utilisation efficiency of combined heat and power plants by increasing the performance of dry-ash output units.....	207
 Razzhivin I.A., Ruban N.Yu., Rudnik V.E., Gusev A.S. Evaluation of the effect of wind-operated power plants on the total inertia of an electric power system.....	220



Metallurgy and Materials Science



 Gorlanov E.S., Polyakov A.A. On solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis. Part 3. Electric field distribution on electrodes.....	235
 Nemchinova N.V., Hoang V.V., Aponchuk I.I. Research into the chemical composition of refinery slag from silicon production for its efficient recycling.....	252
 Khalifa A.A., Bazhin V.Yu., Shalabi E.-M.H., Abdelmoneim A., Omran M. Improving the efficiency of the carbothermal reduction of red mud by microwave treatment.....	264



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 индификатор 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



Разработка сварной конструкции и технологии изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи

© А.С. Пятовский*, В.Л. Бройдо**

*ООО «ИЗТМ-Инжиниринг», г. Иркутск, Россия

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

Резюме: Цель – разработка сварной конструкции и технологии изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи взамен ранее использовавшейся литой конструкции из стали 35Л. Новая крупногабаритная конструкция (3742 x 3020 x 3275 мм) должна обеспечить прочное и герметичное сопряжение трех толстостенных (до 40 мм) вальцованных обечаек. Разработка конструкции и ее элементов велась с использованием трехмерного моделирования в программе «Компас-3D». Зоны сопряжения обечаек оформлены с использованием переходных элементов в виде гнутых сегментов двоякой кривизны. Установлено, что применение технологических припусков при гибке цилиндрических обечаек секторов обеспечивает получение деталей требуемой точности (отклонения по диаметру – не более 5 мм). Вальцовка обечаек, имеющих сложную криволинейную линию сопряжения, может выполняться на прямоугольной заготовке. Криволинейная линия сопряжения на заготовке вырезается на газорезательной машине с числовым программным управлением участками длиной 150–170 мм с перемычками 50–70 мм. Показано, что удаление перемычек ручной газовой резкой и подготовка кромок под сварку могут выполняться только после вальцовки и сварки прямолинейного стыка обечайки. Отработаны приемы доводки сегментов двоякой кривизны при сборке конструкции с помощью специальных гидравлических распорок. С использованием данных предложенных приемов доводки разработана технология изготовления сварной конструкции корпуса. За счет оптимизации конструкции корпуса удалось добиться снижения его массы на 5,5% от массы литого корпуса. По разработанной технологии изготовлены два клапана для замены изношенных на крупнейшую в Европе домну 5500 м³ «Северянка» ПАО «Северсталь». Использованные технические решения предоставили значительное снижение трудоемкости изготовления при обеспечении необходимого качества конструкции и снижение массы конструкции по сравнению с литой.

Ключевые слова: дымовой клапан, доменная печь, сварная конструкция, отливка, обечайка, вальцовка

Для цитирования: Пятовский А.С., Бройдо В.Л. Разработка сварной конструкции и технологии изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 148–160. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-148-160>

Development of a welded structure and a technology for manufacturing a smoke valve casing ID 2000 for use in a blast furnace

Artur S. Pyatovsky*, Vladimir L. Broido**

* Irkutsk Heavy Machinery Plant – Engineering LLC, Irkutsk, Russia

** Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of this work is to develop a welded structure and a technology for manufacturing a smoke valve casing ID 2000 for use in a blast furnace to substitute the previously used cast design from 35L steel. The proposed large-size structure (3742 x 3020 x 3275 mm) should provide a strong and tight connection of three thick-walled (to 40 mm) rolled shells. The development of the structure and its elements was carried out using three-dimensional modelling in the Compass-3d software. The joining zones of the shells are designed as bent transition elements with a double curvature. It was found that the use of technological allowances when bending the cylindrical shells of sectors makes it possible to obtain parts with the required accuracy (a deviation in diameter not higher than 5 mm). The rolling of the shells having a complex curved line of joining can be performed on a rectangular workpiece. A curved joining line with the sections having a length of 150–170 mm and cross-connections of 50–70 mm is cut out on the workpiece using a computerized flame-cutting machine. It was shown that the removal of the cross-connections by manual gas cutting and preparation of edges for welding can be performed only after rolling and welding of the straight joint of the shell. Techniques for fitting

the double-curved segments during assembling using special hydraulic struts were elaborated. These techniques were used to develop a technology for manufacturing a welded casing structure. Due to the optimization of the casing design, its weight was reduced by 5.5% compared to that produced by casting. Using the developed technology, two valves were manufactured to replace obsolete valves at the largest blast furnace (5500 m³) in Europe "Severyanka", PJSC Severstal. The described technical solutions provided a significant reduction in the labour intensity of manufacturing the presented structure, at the same time as ensuring its high quality and optimized weight compared to that produced by casting.

Keywords: smoke valve, blast furnace, welded structure, casting, shell, rolling

For citation: Pyatovsky AS, Broido VL. Development of a welded structure and a technology for manufacturing a smoke valve casing ID 2000 for use in a blast furnace. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):148–160. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-148-160>

ВВЕДЕНИЕ

Иркутский завод тяжелого машиностроения (ИЗТМ) более 70 лет специализируется на изготовлении клапанов, применяемых в доменном производстве. Оборудование для доменных печей создавалось в сотрудничестве со специализированными проектными и научно-исследовательскими институтами и успешно работает на всех заводах черной металлургии России и СНГ, а также в других странах мира.

Дымовой клапан служит для отделения воздухонагревателей от дымового боров

при его работе на «дутье». Для уменьшения потерь тяги в дымовом тракте и более равномерного распределения продуктов сгорания газа по ячейкам насадки устанавливают для каждого воздухонагревателя два дымовых клапана.

Дымовые клапаны бывают шибберного, кривошипно-тарельчатого и тарельчатого типов. Наиболее широкое применение получили угловые тарельчатые дымовые клапаны благодаря их компактности, надежности в работе и обеспечении плотности перекрытия.



Рис. 1. Дымовой клапан Ду2000 производства Иркутского завода тяжелого машиностроения (корпус литой)

Fig. 1. Du 2000 smoke valve produced by the Irkutsk Heavy Engineering Plant (cast body)



В зависимости от объема доменной печи дымовые клапаны изготавливаются диаметрами 1100, 1300 и 2000 мм [1]. Традиционно корпус дымового клапана Ду2000 изготавливался из стали 35Л методом литья (рис. 1).

До настоящего времени дымовые клапаны на ИЗТМ выпускались серийно, и изготовление крупногабаритного сложного корпуса технологией стального литья в разовую песчаную форму было целесообразно в силу высокой производительности процесса. Но, несмотря на отработанную технологию, изготовление методом литья имеет ряд недостатков, наиболее существенными из них являются необходимость изготовления сложной дорогостоящей оснастки и образование большого количества технологических дефектов отливок в виде трещин и усадочных раковин, газовых раковин, неплотностей и т.д. Наличие данных дефектов вызывало необходимость проведения весьма трудоемких работ по их устранению и повторным испытаниям, существенно повышающим себестоимость изготовления и удлинением цикл изготовления. Особенно большой объем работ по исправлению неплотностей отливки пришлось выполнять при изготовлении первого литого корпуса клапана 2000 мм³, что, безусловно, вызвало срыв срока поставки машины заказчику. Основными местами пористого металла явились зоны сопряжений и в первую очередь – сопряжений с фланцами. Работы по исправлению дефектов литья проводились в процессе гидроиспытаний в местах обнаружения течей путем разделки кромок и заварки ручной дуговой сваркой, причем в одной и той же зоне эти работы выполнялись неоднократно, поскольку течи обнаруживались рядом с уже заваренными дефектами.

Известно, что изготовление крупных корпусных узлов из проката, литых, кованных и штампованных заготовок имеет ряд преимуществ по сравнению с изготовлением крупных литых деталей сложной конструкции [2–6].

Практика изготовления сварных корпусов клапанов Ду1000 и Ду1300 показала, что (несмотря на сложность обеспечения сопряжения вальцованных обечаек) качество их выгодно отличается от литых из-за более высо-

кого качества листового металла и отсутствия неплотностей в местах сопряжений обечаек и их сопряжений с фланцами. На основании вышеизложенного была определена цель работы: разработка конструкции и технологии изготовления сварной конструкции клапана.

РАЗРАБОТКА СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА КЛАПАНА

При разработке сварной конструкции корпуса основной задачей являлось обеспечение прочности, герметичности и технологичности не только не уступающих его литому аналогу, но и превосходящих его. Таким образом, улучшение эксплуатационных свойств и удешевление технологии изготовления корпуса являлись модернизацией клапана в целом [7–10].

К конструкции корпуса предъявлялись следующие требования:

- применяемый материал должен иметь хорошую свариваемость;
- толщина листовых элементов должна удовлетворять требованиям прочности при гидравлических испытаниях давлением 5,4 МПа;
- минимальное количество сварных швов;
- технологичность операций изготовления деталей и сборки корпуса.

Важным условием при разработке конструктивной схемы было обеспечение свободного хода тарелки, обеспечивающей перекрытие клапана и сохранение всех присоединительных размеров.

За основу конструкции была принята конструкция литого корпуса, разбитого на элементы из листового проката, преимущественно обечаек и фланцы.

Также важным критерием при проектировании была необходимость исключить возможность вредного влияния остаточных деформаций и напряжений, в том числе сварочных, а также концентрации напряжений [11–15]. Принятые конструктивные решения обеспечили наиболее равномерное распределение напряжений в элементах и деталях без входящих углов, резких перепадов сечения и других концентраторов напряжений.

Для изготовления данной конструкции

применяется сталь СтЗсп по ГОСТ 380-2005¹ «Сталь углеродистая обыкновенного качества». Данная сталь обладает хорошей свариваемостью и достаточными механическими свойствами^{1,2}.

Согласно техническим условиям завода, давление для испытаний клапанов металлургического оборудования на прочность и плотность принимается выше рабочего на 20%, что составляет 5,4 МПа. Соответственно, конструкция корпуса должна обладать достаточной прочностью, удовлетворяющей данному требованию. Путем прочностного расчета было определено, что толщины 40 мм для листовых элементов конструкции будет достаточно.

При разработке сварных соединений руководствовались требованиями ГОСТ 14771-76³ «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» и ГОСТ 23518-79⁴ «Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами». Применение механизированной сварки проволокой в среде защитного газа стало наиболее рациональным и технологичным способом получения равнопрочного соединения элементов корпуса. В силу сложной формы, крупных габаритов конструкции применение автоматизированной или ручной дуговой сварки покрытыми электродами невозможно или нецелесообразно. В качестве сварочного материала применялась проволока Св-08Г2С ГОСТ 2246-70⁵, взаимодействующая со смесью защитного газа: 78% Ar + 22% CO₂.

Конструкторские разработки велись в хорошо зарекомендовавшем себя на предприятии программном комплексе Компас 3D с применением твердотельного моделирова-

ния. На рис. 2 изображена 3D-модель корпуса клапана. Использование технологии трехмерного моделирования при разработке корпуса позволило максимально точно определить контуры и радиусы деталей, их сопряжения и взаимное расположение.

Но, несмотря на качественную проработку конструкции и тщательную подгонку элементов 3D-сборки, полностью уйти от проблем сопряжения деталей не удалось. Таким образом, в месте соединения трех обечаек в силу разности их радиусов образовался значительный зазор, который пришлось перекрывать узкими «лоскутами», образующими сосредоточение сварных швов (рис. 3), что является негативным фактором для сварных конструкций и требующим проведения термообработки (общей или местной) для снятия остаточных напряжений. На рис. 4 и 5 показаны чертежи листовых элементов корпуса.

Основной сложностью при разработке деталей было точное определение размеров контуров разверток деталей, т.к. это наиболее важный параметр, от которого в последующем зависит и точность сборки самого корпуса.

Даже небольшие просчеты как минимум могут привести к образованию увеличенных зазоров либо отклонению геометрических параметров конструкции от чертежных, но применение системы автоматизированного проектирования позволило эффективно справиться с данной задачей.

Из-за большого диаметра обечаек длина их разверток выходила за пределы размеров стандартного листа 1500x6000 мм, в связи с чем в чертежах была предусмотрена стыковка заготовок из нескольких частей с разделкой кромок для обеспечения полного провара.

¹ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки (с изм.). Введ. 01.07.2008. М.: Стандартинформ, 2009, 11 с.

²Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В. [и др.]. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. М., 2014. 1216 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mashin.ru/files/stranicy_iz_marochn15.pdf (13.09.2020).

³ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с изм.). Введ. М.: Стандартинформ, 2007.

⁴ГОСТ 23518-79. Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. Введ. 01.01.1980. М.: Стандартинформ, 2011.

⁵ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия (с изм.). Введ. 01.01.1973. М.: Стандартинформ, 2008.



Типы и конструктивные элементы сварных соединений подбирались с учетом необходимости обеспечения равнопрочного соединения с основным металлом, все сварные соединения конструкции имеют Х-образную

разделку кромок, обеспечивающую провар по всей толщине деталей [16–18]. На рис. 6 изображен разрез корпуса с указанием сварных швов (без фланцев).

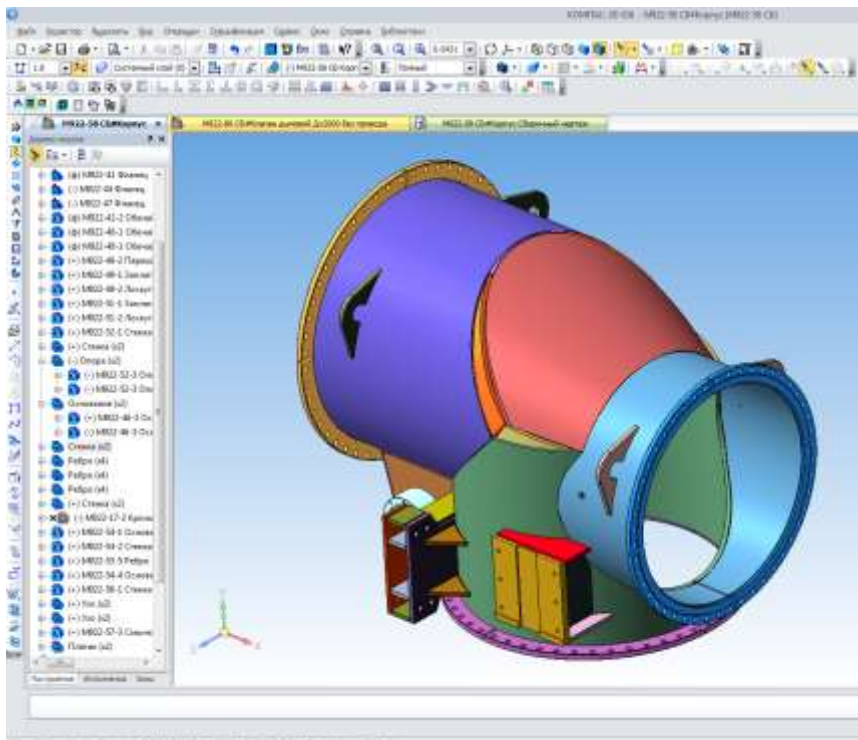


Рис. 2. 3D-модель корпуса дымового клапана Ду2000
Fig. 2. 3D model of Du 2000 smoke valve body

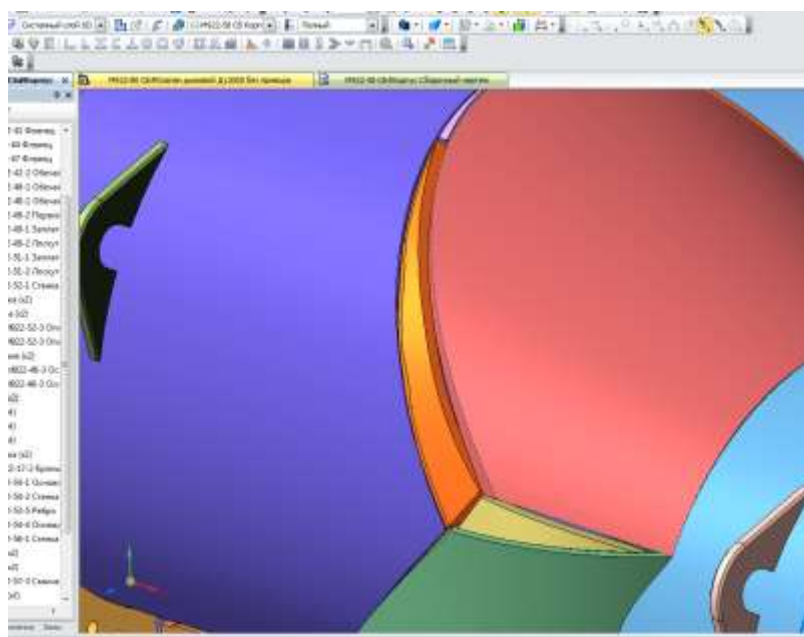


Рис. 3. Место стыка трех обечаек разного радиуса
Fig. 3. Joint of three shells of different radii

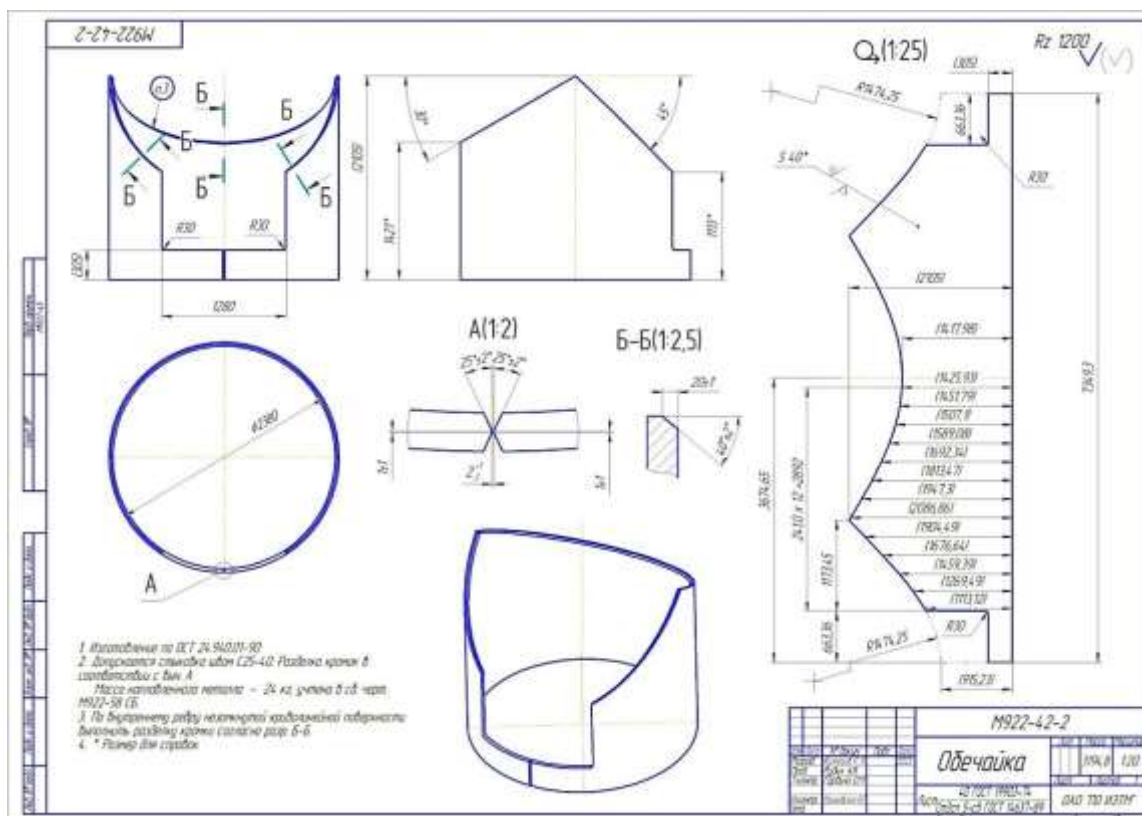


Рис. 4. Чертеж нижней обечайки с разверткой
 Fig. 4. Drawing of the lower shell with a scan

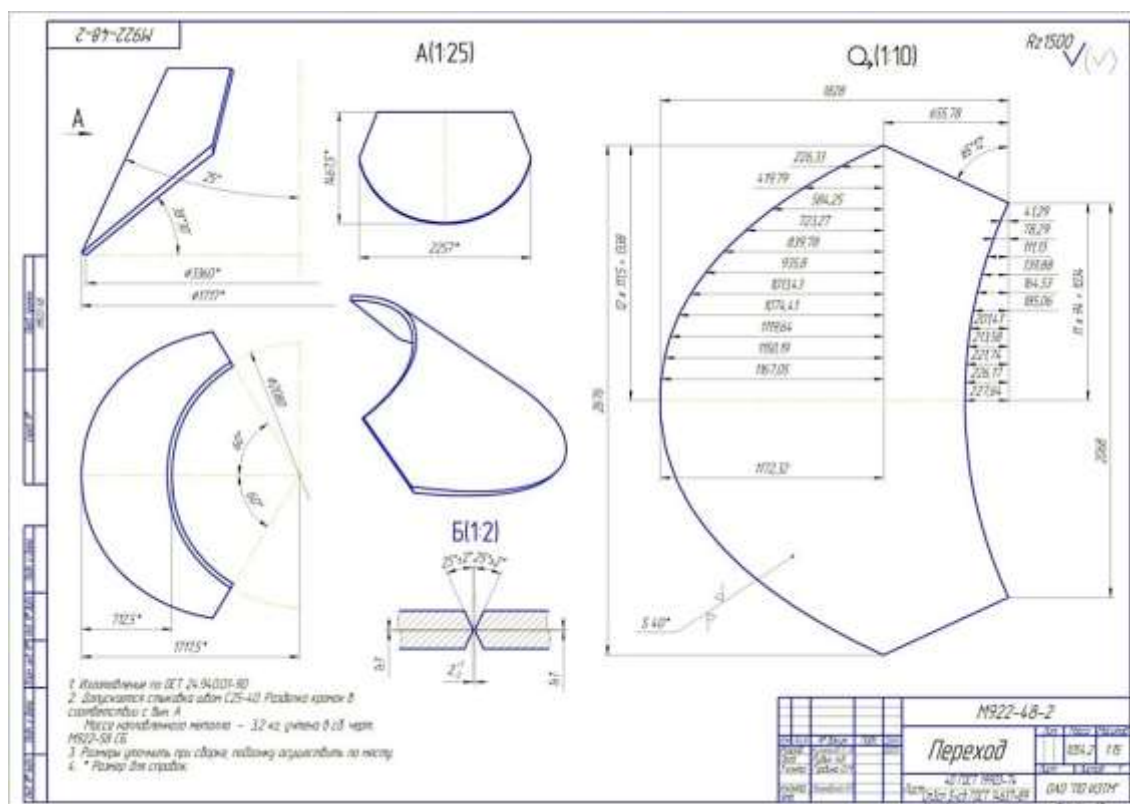


Рис. 5. Чертеж перехода с разверткой
 Fig. 5. Drawing of the transition with a scan

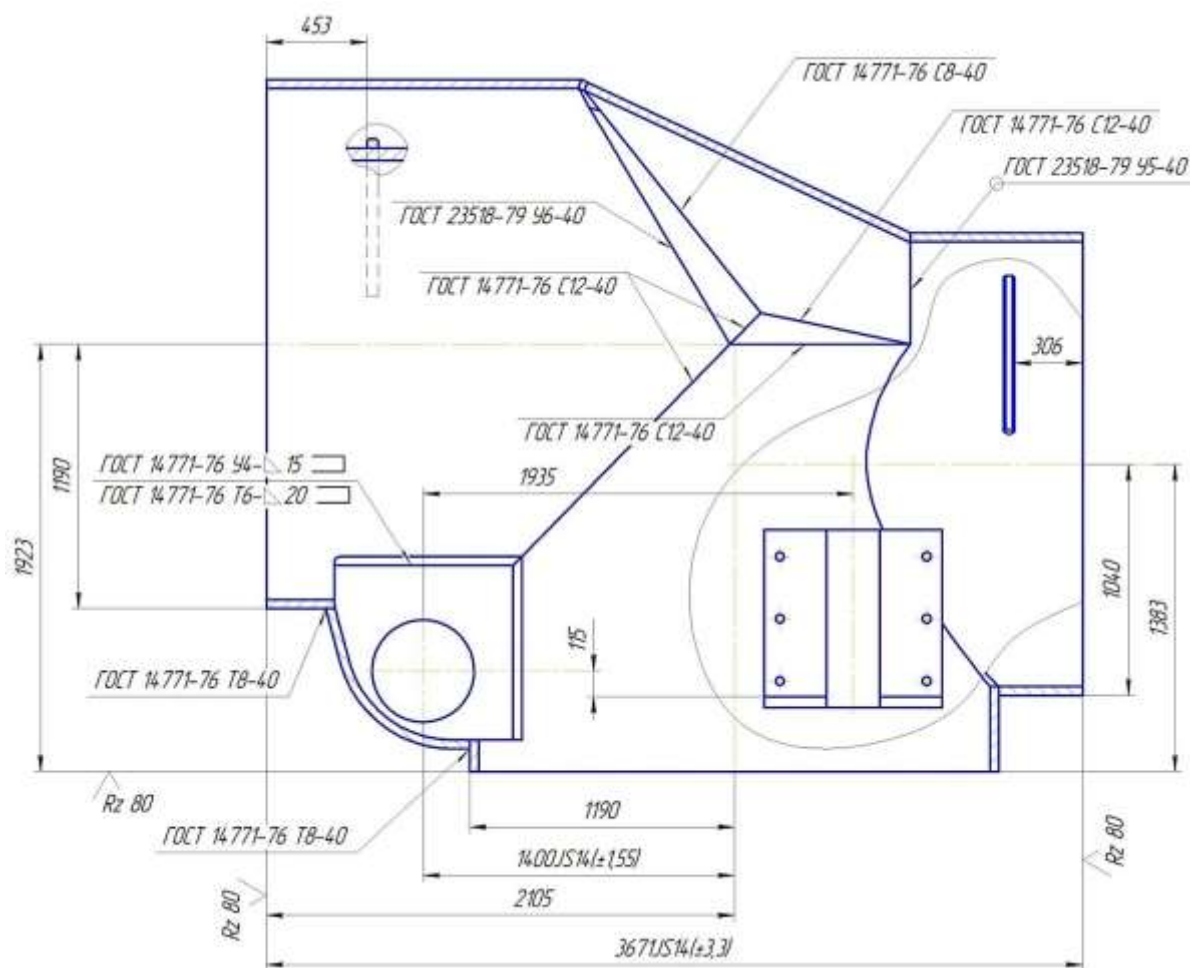


Рис. 6. Разрез корпуса с указанием сварных швов
Fig. 6. Body section with indication of welds

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Основными проблемами при изготовлении сварной конструкции явились изготовление точных гнутых деталей, гибка точных цилиндрических деталей, имеющих различную высоту (см. рис. 4), сборка конструкции без использования специальных приспособлений из-за невозможности разработки и изготовления в условиях единичного производства, необходимость изготовления корпуса с минимальным значением остаточных напряжений с проведением механической обработки поверхностей под установку фланцев.

Заготовительные операции. Из-за необходимости точной гибки листовых заготовок с предельной толщиной для имеющих листогибочных вальцев с гидравлическим приводом НБ 2224, для улучшения качества

гибки мелких деталей использована предварительная термическая обработка листа для повышения пластических свойств; применение технологических припусков на все гнутые детали из-за невозможности подгибки радиусов у краев развертки в вальцах, согласование чертежей деталей конструкции проводилось параллельно с проведением опытных работ по изготовлению деталей [16].

В качестве разупрочняющей термической обработки использован отжиг листа, после этого выполнены механические испытания металла в состоянии поставки (нормализация) и после отжига, причем отжиг проводился как на образцах в лабораторной печи, так и листах металла в цеховой печи [18]. Сравнительные результаты механических испытаний приведены в таблице.

Механические свойства листа в состоянии поставки и после термообработки
Mechanical properties of the sheet in the as-received condition and after heat treatment

Предел прочности σ_B , МПа		Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа		Относительное удлинение δ , %		Относительное сужение Ψ , %		Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²		Твердость, НВ	
До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО	До ТО	После ТО
439	409	240	210	24,7	26,3	57,0	53,4	135	149	126	111

Вырезка заготовок для гибки выполнялась на газорезательной машине с числовым программным управлением «Танак», обеспечивающей точность деталей $\pm 0,5$ мм на габариты листа (1500х6000 мм), причем на длину развертки учитывался технологический припуск по 500 мм на сторону для обеспечения точности радиуса гибки. Вырезка заготовок, габариты развертки которых с учетом технологического припуска превышают габариты листа, выполнялась с предварительной стыковкой полотнищ требуемых размеров сборкой, сваркой и правкой. Для исключения искажения размеров цилиндрических обечаек, имеющих разную высоту по периметру, вырезались и гнулись прямоугольные заготовки высотой по максимальной высоте обечайки, у которых криволинейная линия развертки сопряжения обечаек при резке выполнялась участками 150 мм с перемычками 50 мм. После гибки, сборки и сварки прямолинейного

шва обечаек перемычки вырезались, затем выполнялся скос кромок под сварку ручной газовой резкой с последующей зачисткой шлифовальной машиной. На рис. 7 показана гнутая обечайка с прерывистой (с перемычками) линией сопряжения.

Для защиты подшипникового узла вальцов при гибке толстостенных конусов разработано, изготовлено и установлено на вальцах специальное защитное приспособление (рис. 8).

Подгибка отдельных мелких переходных деталей, в том числе и сферической формы, выполнялась на горизонтальном правильно-гибочном гидравлическом прессе усилием 250 т.

СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Сборка под сварку производилась на сборочной плите по разметке с использованием различных, в том числе и регулируемых



Рис. 7. Гнутая заготовка с прерывистой линией сопряжения, выполненная из предварительно стыкованного полотнища

Fig. 7. Bent blank with an interrupted conjugation line made of a pre-joined sheet



Рис. 8. Гибка конуса с использованием защитного приспособления у подшипникового узла вальцев
Fig. 8. Cone bending using a protective device at the roller bearing assembly

винтовых, подложек и подставок. Перед сборкой производилась нивелировка станда. В процессе сборки и контроля использовались также лазерный уровень и рулетка. Прихватки выполнялись ручной дуговой сваркой электродами типа Э50А по ГОСТ 9467-75⁶ марки ТМУ-21У диаметром 3 и 4 мм (рис. 9). Подгибка элементов при сборке осуществлялась с местным нагревом пламенем горелки, закреплении или приварки распорок и стяжек. Для сохранения формы обечайек в процессе изготовления выполнялась приварка технологических распорок из уголка^{6,7} [19, 20].

После сварки выполнена местная термообработка зоны сварных соединений – отпуск для снятия остаточных напряжений с использованием для нагрева мощной газокислородной горелки [18–25]. Нагрев до температуры

450°C выполнялся с внутренней стороны корпуса, контроль температуры выполнялся с наружной стороны при помощи пирометра, продолжительность нагрева – не менее 1 ч на стык. Для замедления охлаждения стыки с наружной стороны укрывались слоем асбеста. Затем швы проверялись УЗК после предварительной проверки на плотность керосином.

Для создания возможностей механической обработки было принято решение механическую обработку конструкции производить до установки фланцев, корпус без фланцев подвергался термообработке, после этого выполнялась механическая обработка, в том числе и обработка для установки фланцев, чистовая механическая обработка фланцев. Дымовой клапан в сборе показан на рис. 10.

⁶ ГОСТ 9467-75. Electrodes covered with metallic for manual arc welding of structural and heat-resistant steels. Types (with amendments). Introduced. 01.01.1977. M.: Standartinform, 2008.

⁷ Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2-х т. Т. 1. / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. М.: Машиностроение, 2004. 624 с.



Рис. 9. Сборка корпуса клапана Иркутского завода тяжелого машиностроения (сварной корпус)
Fig. 9. Assembly of the valve body produced by the Irkutsk Heavy Engineering Plant (welded body)



Рис. 10. Дымовой клапан Ду 2000 мм³ производства
Fig. 10. Smoke valve Du 2000 m³



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовление крупного клапана Ду 2000 в сварном варианте потребовало разработки новой конструкции и специальной технологии, использован ряд нестандартных решений. В статье описаны ключевые моменты разработки конструкции и технологии только корпуса клапана. Кроме того, выполнен ряд операций по изготовлению заготовок, сборке, сварке, наплавке, термообработке, механической обработке, сборке и испытаниям плотности поверхностей сопряжения клапана. Опыт изготовления первой машины показал эффективность использования сварного варианта изготовления корпуса. Значительно

снижена себестоимость изготовления машины, сокращена трудоемкость изготовления и повышено качество продукции; за счет оптимизации конструкции корпуса удалось добиться снижения его массы на 5,5% от массы литого (13600 кг).

По разработанной технологии изготовлены два клапана для замены изношенных на крупнейшую в Европе домну 5500 м³ «Северянка» ПАО «Северсталь». Использованные технические решения предоставили значительное снижение трудоемкости изготовления при обеспечении необходимого качества конструкции и снижение массы конструкции по сравнению с литой.

Список литературы

1. Щиренко Н.С. Механическое оборудование доменных цехов. М.: Изд-во «Металлургиздат», 1962. 525 с.
2. Рыжков Н.И. Производство сварных конструкций в тяжелом машиностроении: организация и технология: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Машиностроение», 1980. 376 с.
3. Liu Yun Qiang, Lv Yong. Study on the Welding of Feeder Hopper and Cylinder Instead of Casting Process // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 599-601. P. 486–488. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.486>
4. Схиртладзе А.Г. Определение целесообразности замены цельнолитых крупногабаритных заготовок сварно-литыми // *Технология металлов*. 2007. № 1. С. 18–22.
5. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. М.: Изд-во «Высшая школа», 1971. 760 с.
6. Giarratani F., Gruver G., Jackson R. Clusters, agglomeration, and economic development potential: empirical evidence based on the advent of slab casting by U.S. steel minimills // *Economic Development Quarterly*. 2007. Vol. 21. No. 2. P. 148–164. <https://doi.org/10.1177/0891242406298833>
7. Патон Б.Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // *Автоматическая сварка*. 2003. № 10-11. С. 7–13.
8. Литвинов А.П., Дерломенко В.В. Свариваемость и работоспособность сварных соединений // *Автоматическая сварка*. 2009. № 9. С. 50–56.
9. Delkhosh E., Khurshid M., Barsoum I., Barsoum Z. Fracture mechanics and fatigue life assessment of box-shaped welded structures: FEM analysis and parametric design // *Welding in the World*. 2020. Vol. 64. No. 9. P. 1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00945-9>
10. Bull J.W., Woodford C.H., Christie W.C., Neau E., James M.N. The low stress design of welded plates using the self-designing structures approach // *Computers & Structures*. 2000. Vol. 78. No. 1-3. P. 487–496.
11. Стеклов О.И., Антонов А.А., Севостьянов С.П. Обеспечение целостности сварных конструкций и сооружений при их длительной эксплуатации с применением реновационных технологий // *Автоматическая сварка*. 2014. № 6-7. С. 7–12.
12. Чутов Е.И., Иванцов Н.В. Совершенствование сварных конструкций применением литых заготовок // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2016. Т. 1. № 12. С. 452–453.
13. Гончаров Н.Г., Колесников О.И., Юшин А.А., Гринев С.М., Временко А.В., Финатов Д.Н. [и др.]. Использование веллолетов в качестве тройниковых соединений при строительстве, реконструкции и ремонте трубопроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2016. № 3. С. 60–64.
14. Nega Hailemariam Fisseha, Hui Yang, Ying Gao. Weld design of vehicle bodies and analysis of welded butt and t-joints using Simufact // *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4. Iss. 7. P. 420–427.
15. Sulaiman M.S., Manurung Yu.H.P., Haruman E., Bin Abdul Rahim M.R., Redza M.R., Lidam R.N.Ak., et al. Simulation and experimental study on distortion of butt and t-joints using weld planner // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011. Vol. 25. Iss. 10. P. 2641–2646. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0701-8>
16. Москвичев В.В. Ресурсное проектирование и безопасность крупногабаритных сварных конструкций // *Сварка в России – 2019: современное состояние и перспективы: тезисы докладов Международной конференции, посвященной 100-летию Б.Е. Патона (г. Томск, 3–7 сентября 2019)*. Томск: Изд-во ИФПМ СО РАН, 2019. С. 209.
17. Бройдо В.Л., Блохнин В.А. Технология изготовления корпуса дымового клапана Ду 2000 доменной печи // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): матер. VI Всерос. науч.-*

техн. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 25–27 апреля, 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 273–280.

18. Фетисов В.П. Оценка пластичности при деформации углеродистой стали // Литье и металлургия. 2019. № 3. С. 85–88. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-85-88>

19. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

20. Вовчук И.П., Шишватова О.В. Конструкторско-технологическое решение получения литой заготовки с удовлетворительной свариваемостью // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. № 12. С. 422–424.

21. Лоза А.В., Чигарев В.В., Шишкин В.В. Повышение качества стальных лито-сварных конструкций // Вестник Приазовского государственного технического уни-

верситета. Серия: Технические науки. 2016. № 33. С. 107–113.

22. Новокрещенов С.А. Пути улучшения качества сварных соединений // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. Т. 7. № 7. С. 152–156.

23. Ющенко К.А. Свариваемость и перспективные процессы сварки материалов // Автоматическая сварка. 2004. № 9. С. 39–44.

24. Радченко М.В., Радченко В.Г. Специфика производства сварных изделий и конструкций: монография: в 2 ч. Ч. 2. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. 204 с.

25. Слепцов О.И., Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н., Харбин Н.Н., Эверстов М.М. Разработка ремонтно-сварочных технологий для восстановления узлов горнодобывающей техники в условиях естественно низких температур // Сварка и диагностика. 2019. № 1. С. 28–31.

References

1. Shchirenko NS. *Mechanical equipment for blast furnace shops*. Moscow: Metallurgizdat; 1962, 525 p. (In Russ.)

2. Ryzhkov NI. *Production of welded structures in heavy engineering: organization and technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1980, 376 p. (In Russ.)

3. Liu Yun Qiang, Lv Yong. Study on the welding of feeder hopper and cylinder instead of casting process. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;599-601:486–488. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.486>

4. Skhirtladze AG. Determining expediency of one-piece large-size blank replacement with cast-welded ones. *Tekhnologiya metallov*. 2007;1:18–22. (In Russ.)

5. Nikolaev GA, Kurkin SA, Vinokurov VA. *Calculation, design and manufacture of welded structures*. Moscow: Vysshaya shkola; 1971, 760 p. (In Russ.)

6. Giarratani F, Gruver G, Jackson R. Clusters, agglomeration, and economic development potential: empirical evidence based on the advent of slab casting by U.S. steel minimills. *Economic Development Quarterly*. 2007;21(2):148–164. <https://doi.org/10.1177/0891242406298833>

7. Paton BE. Modern research and development trends in welding and structural strength. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*. 2003;10-11:7–13.

8. Litvinov AP, Derloimenko VV. Weldability and performance of welded joints. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*. 2009;9:50–56.

9. Delkhosh E, Khurshid M, Barsoum I, Barsoum Z. Fracture mechanics and fatigue life assessment of box-shaped welded structures: FEM analysis and parametric design. *Welding in the World*. 2020;64(9):1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00945-9>

10. Bull JW, Woodford CH, Christie WC, Neau E, James MN. The low stress design of welded plates using the self-designing structures approach. *Computers & Structures*. 2000;78(1-3):487–496.

11. Steklov OI, Antonov AA, Sevost'yanov SP. Providing integrity of welded designs and structures during their long-

term operation using renovation technologies. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*. 2014;6-7:7–12.

12. Chutov EI, Ivantsov NV. Improving weldments application cast billets. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2016;1(12):452–453. (In Russ.)

13. Goncharov NG, Kolesnikov OI, Yushin AA, Gridnev SM, Vremenko AV, Finatov DN, et al. Application of weldolets as T-connectors for construction, renovation and repair of pipelines. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov*. 2016;3:60–64. (In Russ.)

14. Nega Hailemariam Fisseha, Hui Yang, Ying Gao. Weld design of vehicle bodies and analysis of welded butt and T-joints using Simufact. *International Journal of Science and Research*. 2015;4(7):420–427.

15. Sulaiman MS, Manurung YuHP, Haruman E, Bin Abdul Rahim MR, Redza MR, Lidam RNAk, et al. Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using weld planner. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011;25(10):2641–2646. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0701-8>

16. Moskvichev VV. Resource design and safety of large welded structures. In: *Svarka v Rossii – 2019: sovremennoe sostoyanie i perspektivy: tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu B.E. Patona = Welding in Russia - 2019: current state and prospects: abstracts of the International conference dedicated to the 100th anniversary of B.E. Paton*. 3–7 September 2019, Tomsk. Tomsk: Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 2019, p. 209. (In Russ.)

17. Brojdo VL, Blohnnin VA. Manufacturing technology of a body of Du 2000 blast furnace smoke valve. *Zhiznennyi tsikl konstrukcionnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii): materialy VI Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Life cycle of structural materials (from manufacturing to disposal): proceedings of VI All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 25–27 April 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical Uni-



versity; 2016, p. 273–280. (In Russ.)

18. Fetisov VP. Evaluation of plasticity during deformation of carbon steel. *Lit'e i metallurgiya*. 2019;3:85–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-85-88>

19. Vinokurov VA. *Tempering of welded structures to reduce stresses*. Moscow: Mashinostroenie; 1973, 216 p. (In Russ.)

20. Vovchuk IP, Shishvatova OV. Technological methods for producing cast blanks with satisfactory weldability. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*. 2016;1(12):422–424. (In Russ.)

21. Loza AV, Chigarev VV, Shishkin VV. Quality improvement of steel cast-welded constructions. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2016;33:107–113.

22. Novokreshchenov SA. Ways of improvement of quality

of welded compounds. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2018;7:152–156. (In Russ.)

23. Yushchenko KA. Weldability and prospective processes of material welding. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*. 2004;9:39–44.

24. Radchenko MV, Radchenko VG. *Features of welded product and structure production: monograph*: in 2 parts. Part 2. Barnaul: Polzunov Altai State Technical University; 2010, 204 p. (In Russ.)

25. Slepcev OI, Sivcev MN, Slepcev GN, Harbin NN, Everstov MM. Development of repair and welding technologies for the recovery of mining equipment in conditions of naturally low temperatures. *Svarka i diagnostika*. 2019;1:28–31. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пятовский Артур Сергеевич,

ведущий инженер-конструктор,
ООО «ИЗТМ-Инжиниринг»,
664007, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции, 1,
Россия;
e-mail: pyatovskii_a@mail.ru

Бройдо Владимир Львович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры машиностроительных технологий
и материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: broidolv@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 22.02.2021; одобрена после рецензирования 19.03.2021; принята к публикации 29.04.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artur S. Pyatovsky,

Leading Design Engineer,
Irkutsk Heavy Machinery Plant – Engineering LLC,
1 Oktyabrsky Revolyutsii St., Irkutsk 664007, Russia;
e-mail: pyatovskii_a@mail.ru

Vladimir L. Broido,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technologies and Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: broidolv@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 22.02.2021; approved after reviewing 19.03.2021; accepted for publication 29.04.2021.



Многофакторное влияние на шероховатость обработанной поверхности

© П.А. Саблин, В.С. Щетинин

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

Резюме: Цель работы – сформировать новый подход к обеспечению качества обработанной поверхности на основе применения многофакторной модели. Предлагаемая модель способна учесть практически все параметры процесса механообработки. К данным основным параметрам относятся режимы резания, динамическая устойчивость процесса резания, тепловые эффекты в зоне резания. Разработка многофакторной модели основывалась на результатах анализа литературных источников, данных экспериментальных исследований, проведенных с использованием методов силового анализа процесса резания, цветовой пирометрии. Полученные данные были обобщены в единую многофакторную модель. Проведены анализ литературных источников, обобщение экспериментальных данных и результатов выполненных исследований по обеспечению качества обработанной поверхности при управлении каким-либо одним входным параметром процесса механообработки. Показано, что качество обработки (шероховатость) достигается посредством применения различных параметров обработки. К ним относятся: рациональные режимы резания, изменение геометрии режущего инструмента, снижение относительных пространственных динамических колебаний инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки, использование методов, воздействующих на физико-механические свойства обрабатываемых материалов. Установлено, что в качестве входного параметра могут выступать динамическая устойчивость процесса, режимы резания или процесс стружкообразования. Показано, что предложенная схема многофакторного влияния параметров обработки на выходной параметр – шероховатость поверхности – применима для любого вида обработки материалов. Созданная модель учитывает все входные параметры механической обработки и нацелена на управление качеством обработанной поверхности, исходя из требуемых эксплуатационных характеристик детали и изделия. На основе предложенной многофакторной схемы планируется создание адаптивной системы, которая будет способна управлять процессом механической обработки на базе многоцелевого станка с числовым программным управлением.

Ключевые слова: шероховатость, стружкообразование, динамическая устойчивость

Для цитирования: Саблин П.А., Щетинин В.С. Многофакторное влияние на шероховатость обработанной поверхности. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 161–171. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-161-171>

Multi-factor influence on the roughness of the finished surface

Pavel A. Sablin, Vladimir S. Shchetinin

Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract: The aim of this work is to develop a novel approach for ensuring the quality of the finished surface based on a multi-factor model. The proposed model can take into account most of the machining process parameters. The main parameters include cutting conditions, dynamic stability of the cutting process, thermal effects in the cutting area. The development of a multi-factor model was based on a literature review and experimental data obtained from the cutting force analysis and colour pyrometry. The data obtained were summarised into a unified multi-factor model. We analysed the key literature sources and summarised the experimental data and findings to assure finished surface quality when controlling one of the input parameters of the machining process. It was shown that the surface quality (roughness) can be achieved by applying different machining parameters. They include the rational cutting conditions, a change in the geometry of a cutting tool, reducing the relative spacial dynamic vibrations of the tool relative to the working surface of the raw part, using the methods influencing the physical and mechanical properties of the processed materials. It was established that the process dynamic stability, the cutting conditions or the chip formation process can be used as an input parameter. The proposed scheme of multi-factor influence of processing parameters on the output parameter - the surface roughness - applies to any materials under processing. The created model takes into account all input parameters of mechanical processing. It aims at the quality management of the finished surface based on the required performance

characteristics of the items. Based on the proposed multi-factor scheme, we plan to create an adaptive system capable of controlling the mechanical processing based on a computer numeric control machining centre.

Keywords: roughness, chip formation, dynamic stability

For citation: Sablin PA, Shchetinin VS. Multi-factor influence on the roughness of the finished surface. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):161–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-161-171>

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассмотрены вопросы управления шероховатостью механической обработки. Поскольку под качеством поверхности детали понимают состояние ее поверхностного слоя, а это включает в себя как высоту микронеровностей (шероховатость), так и физико-механическое состояние поверхностного слоя, то авторы в данной работе предлагают использовать термин «качество» как синоним понятия «шероховатость» и ограничиться лишь оценкой геометрических характеристик поверхности.

В современном автоматизированном производстве, где количество безлюдных технологий неизменно растет, роль контроля за каким-либо процессом или результатом повышается в разы. В этой связи вопрос обеспечения качества обработанной поверхности в условиях автоматизированного производства, которым занимаются ведущие научные школы страны и мира, остается актуальным и сегодня.

Качество обработки поверхности является как составным параметром точности обработки, так и самостоятельным параметром. Например, обеспечив высокую точность линейного размера, высокое качество обработанной поверхности обеспечивается автоматически (по умолчанию). Но в то же время данное правило никак не действует в «обратном направлении», то есть, обеспечив высокое качество обработанной поверхности, нельзя однозначно говорить о том, что мы обеспечили высокую точность.

Одними из первых, кто начал изучать процессы, происходящие в зоне резания, стали русские ученые И.А. Тиме и Я.Г. Усачев. Механизмы пластической деформации при резании в своих работах изучали как зарубежные, так и отечественные ученые: А.М. Розенберг, М.И. Клушин, Н.Н. Зорев и др.

Актуальность вопросов, связанных с по-

вышением надежности процессов механообработки, приводит к решению целого ряда задач, таких как:

- управление устойчивостью процесса обработки;
- повышение эффективности стружкодробления;
- повышение работоспособности режущего инструмента;
- повышение точности и качества изготовленных деталей.

Поэтому эффективность механической обработки в частных случаях зависит не только от постоянной модернизации совершенствования динамики станочного оборудования, но и от глубины проработки явлений, происходящих при резании. В этой связи управлять выходными параметрами механообработки становится невозможно без углубленного изучения физических процессов при резании и, прежде всего, механизма деформации срезаемого слоя, устойчивости упругой системы станочного оборудования, закономерностей формообразования, а также изнашивания и разрушения режущего инструмента.

Система резания является открытой термодинамически неустойчивой системой, через которую проходит поток механической и тепловой энергии, вызывающий фазовые и структурные превращения в приконтактных слоях и формирование вторичных (диссипативных) структур. Устойчивость и оптимальное функционирование системы резания будут определяться интенсивностью протекания этих процессов, взаимодействием с упругой системой станка и внешней средой.

Все перечисленные выше факторы, безусловно, влияют на качество обработанной поверхности. Большое количество научных работ в области резания материалов посвящено управлению тем или иным параметром процесса механообработки с целью повыше-



ния качества, либо производительности обработки. Также широкий спектр работ посвящен управлению сразу же несколькими параметрами процесса резания.

Не умаляя заслуг ведущих научных школ в области обработки материалов резанием, авторы предлагают рассмотреть многофакторный подход к управлению качеством обработанной поверхности через воздействие на широкий спектр параметров процесса механической обработки.

НОВЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Если обеспечение точности обработки достигается за счет жесткости системы «станок–приспособление–инструмент–заготовка» [1], точных узлов станка и приспособлений, систем точного позиционирования и относится к области станкостроения и технологии машиностроения, то качество обработки хотя и за-

висит от точности, но относится к области процесса отделения от обрабатываемого материала стружки с помощью режущего клина и получения обработанной поверхности с заданными параметрами шероховатости.

Так, например, в своих работах [2–4] М.Р. Гимадеев впервые получил зависимость качества обработки, а именно: параметров шероховатости (R_a , R_z , R_q , R_p , R_c , R_t , R_v , R_{sm} , R_{ku} , ... R_{sk}) не только от режимов обработки, но и от способов фрезерования. Благодаря тщательному подбору способа обработки, траектории движения режущего инструмента, формы режущего инструмента и стратегии обработки, есть возможность получать заданный параметр шероховатости.

В своей работе [3] автор впервые вывел корреляцию между параметрами шероховатости, согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014¹, для определенных способов механической обработки (рис. 1).

	R_a	R_z	R_q	R_p	R_c	R_t	R_v	R_{ku}	R_{sk}	R_{sm}
R_a	1,00	0,91	0,99	0,94	0,91	0,86	0,74	-0,28	-0,13	0,18
R_z	0,91	1,00	0,92	0,93	0,84	0,98	0,92	-0,14	-0,30	-0,03
R_q	0,99	0,92	1,00	0,95	0,91	0,88	0,76	-0,24	-0,15	0,15
R_p	0,94	0,93	0,95	1,00	0,86	0,89	0,72	0,01	-0,03	0,06
R_c	0,91	0,84	0,91	0,86	1,00	0,78	0,69	-0,20	-0,04	0,34
R_t	0,86	0,98	0,88	0,89	0,78	1,00	0,93	-0,11	-0,29	-0,10
R_v	0,74	0,92	0,76	0,72	0,69	0,93	1,00	-0,28	-0,53	-0,13
R_{ku}	-0,28	-0,14	-0,24	0,01	-0,20	-0,11	-0,28	1,00	0,58	-0,24
R_{sk}	-0,13	-0,30	-0,15	-0,03	-0,04	-0,29	-0,53	0,58	1,00	0,22
R_{sm}	0,18	-0,03	0,15	0,06	0,34	-0,10	-0,13	-0,24	0,22	1,00

Рис. 1. Корреляционная зависимость параметров шероховатости при фрезеровании концевой сферической фрезой

Fig. 1. Correlation dependence of roughness parameters when milling with a ball-nose end mill

¹ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Введ. 01.01.2016. М.: Стандартиформ, 2019.

Из рис. 1 авторы [3] выявили корреляционную зависимость параметров шероховатости при фрезеровании сферической концевой фрезой:

$$R_z = 0,391 + 4,022 \cdot R_a;$$

$$R_t = 0,284 + 4,531 \cdot R_a;$$

$$R_v = -0,531 + 0,403 \cdot R_t;$$

$$R_g = 0,039 + 1,145 \cdot R_a;$$

$$R_p = 0,499 + 2,274 \cdot R_a;$$

$$R_c = 0,165 + 3,630 \cdot R_a.$$

Но качество обработанной поверхности (то есть высота микронеровностей) при этом так и остается величиной, которая зависит от режимов обработки, геометрии режущего инструмента, температурной картины в зоне резания и многого другого.

СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ И ТЕМПЕРАТУРА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

При увеличении скорости резания при обработке различных материалов [5] происходит последовательное изменение характера стружкообразования от элементной к сливной, а далее к суставчатой (сегментной). Как известно, сегментная стружка образуется либо при незначительном превышении рекомендуемых режимов резания, а именно – скорости, либо при обработке труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные стали и титановые сплавы².

В своей работе М.И. Клушин [6] впервые связал механизм сегментного стружкообразования с температурными разупрочнениями, т.е. с адиабатическими процессами в зоне резания.

Также на характер стружкообразования оказывают большое влияние области локализованного сдвига, как в самой зоне резания, так и в точке контакта стружки с перед-

ней поверхностью инструмента и в точке контакта задней поверхности инструмента с заготовкой [7].

Пластическая деформация, которая локализована в зоне сдвига, сопровождается выделением большого количества тепла, а также структурными и фазовыми превращениями. В этой связи температура стружки в момент отделения ее от обрабатываемого материала может достигать температуры плавления металла, особенно выражено это происходит при высокоскоростной обработке.

Анализ температурных картин, которые представлены на рис. 2 б и 3 б, показывает, что при высокоскоростном фрезеровании закаленной стали 45 температура стружки достигает 813°C, а средняя температура на поверхности стружки может достигать 678°C; при обработке титанового сплава ВТ3 максимальная температура стружки составляет 1041°C, а средняя – 917°C [8].

Для повышения эффективности механической обработки, исследования тепловых процессов в зоне резания должны установить взаимосвязь температуры стружки с шероховатостью поверхности.

На рис. 4–7 показаны графики зависимости силы резания, шероховатости поверхности и температуры стружки для стали 45 и титанового сплава ВТ3.

В связи с этим следует сделать промежуточный вывод, что при детальном исследовании процесса высокоскоростной обработки необходимо использовать сразу несколько методов диагностики [9].

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА МАТЕРИАЛ

В работе [10] авторы исследуют шероховатость деталей из полимерных материалов, предварительно обработанных поверхностно-активными веществами (ПАВ). В табл. 1 показано значительное снижение шероховатости поверхности детали, которую подвер-

²Саблин П.А. Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки при фрезеровании: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Комсомольск-на-Амуре, 2008. 141 с.



гали предварительной обработке поверхностно-активными веществами.

Аналогичные исследования проводились в работе [11], в которой также как и в работе [10] наблюдается снижение шероховатости обработанной поверхности. Только в данном [11] случае снижение шероховатости происходит за счет предварительной виброобработки связующего. На стеклопластик Этал Т 210-Т11-ГВС9 воздействовали следующими параметрами: колебания частотой 100 Гц с

амплитудой 60 мкм в течение 5 мин.

В табл. 2 отображены результаты снижения шероховатости поверхности при обработке стеклопластика.

Существуют также работы, направленные на повышение качества обработанной поверхности при различном физическом воздействии на металлическую заготовку (лазерное воздействие, ультразвуковое воздействие и т.д.).



a



b

Рис. 2. Процесс высокоскоростной обработки титанового сплава ВТ3 (а) и тепловой снимок (б).

Режимы резания: $V = 370$ м/мин, $S = 0,05$ мм/зуб, $t = 1,1$ мм

Fig. 2. High-speed processing of VT3 titanium alloy (a) and a heat snapshot (b).

Cutting modes: $V = 370$ m/min, $S = 0.05$ mm/tooth, $t = 1.1$ mm



a



b

Рис. 3. Процесс высокоскоростной обработки закаленной стали 45 твердостью 52HRC (а) и тепловой снимок (б).

Режимы резания: $V = 448$ м/мин, $S = 0,05$ мм/зуб, $t = 1,2$ мм

Fig. 3. High-speed processing of 45 hardened steel with the hardness of 52 HRC (a) and a heat snapshot (b).

Cutting modes: $V = 448$ m/min, $S = 0.05$ mm/tooth, $t = 1.2$ mm

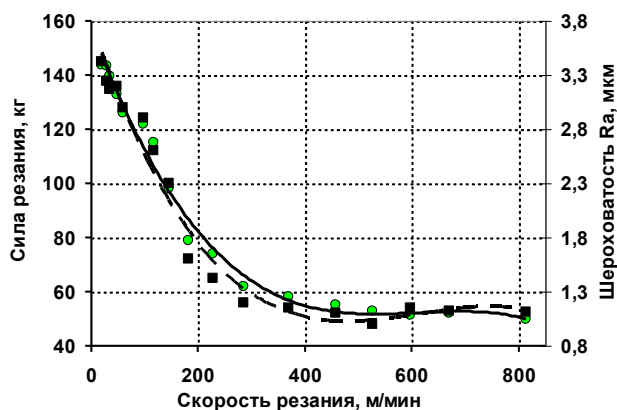


Рис. 4. Корреляционная зависимость силы резания (сплошная линия) и шероховатости поверхности (пунктирная линия) от скорости резания при обработке закаленной стали 45 ($s = 0,05$ мм/зуб; $t = 1,2$ мм)

Fig. 4. Correlation dependence of the cutting force (solid line) and the surface roughness (dotted line) on the cutting speed when processing hardened steel 45 ($s = 0.05$ mm / tooth; $t = 1.2$ mm)

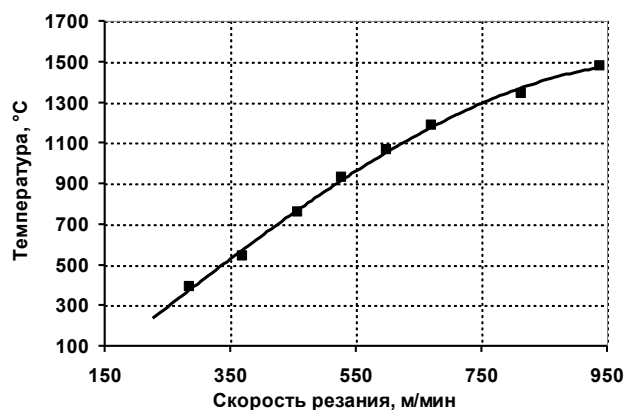


Рис. 5. Зависимость средней температуры поверхности стружки от скорости резания при обработке закаленной стали 45 ($s = 0,05$ мм/зуб; $t = 1,2$ мм)

Fig. 5 Average temperature of chip surface vs cutting speed when processing hardened steel 45 ($s = 0.05$ mm / tooth; $t = 1.2$ mm)

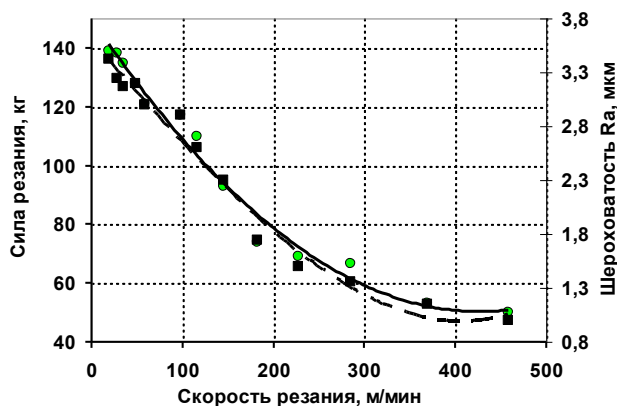


Рис. 6. Корреляционная зависимость силы резания (сплошная линия) и шероховатости поверхности (пунктирная линия) от скорости резания при обработке титанового сплава VT3 ($s = 0,05$ мм/зуб; $t = 1$ мм)

Fig. 6. Correlation dependence of the cutting force (solid line) and the surface roughness (dotted line) on the cutting speed when processing VT3 titanium alloy ($s = 0.05$ mm / tooth; $t = 1$ mm)

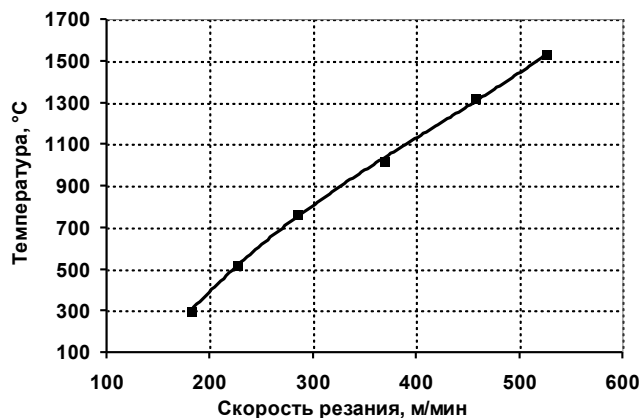


Рис. 7. Зависимость средней температуры поверхности стружки от скорости резания при обработке титанового сплава VT3 ($s = 0,05$ мм/зуб; $t = 1$ мм)

Fig. 7. Average temperature of chip surface vs cutting speed when processing VT3 titanium alloy ($s = 0.05$ mm / tooth; $t = 1$ mm)

ГЕОМЕТРИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ДИНАМИКА ПРОЦЕССА

Очень большое количество исследований посвящено управлению динамической устойчивостью технологической системы на основе различных подходов. В частности, широкий спектр работ посвящен исследованиям вибраций [9–11] и качества обработанной поверхности при изменении геометрии режущего инструмента.

Большой вклад в исследование вибраций при резании внес А.П. Соколовский [12], установив при этом зависимость амплитуды профилограммы от геометрии режущего инструмента.

Так, например, главный угол в плане ϕ значительно влияет на интенсивность колебаний (рис. 8) [12]. При уменьшении этого угла интенсивность вибраций резко возрастает. Такой характер зависимости понятен, учитывая, что при уменьшении угла ϕ растет



Таблица 1. Результаты снижения шероховатости поверхности детали при предварительной обработке поверхностно-активными веществами

Table 1. Results of part surface roughness reduction under surfactant pretreatment

Материал	Стратегия обработки	Параметры шероховатости, мкм						
		R_a	R_z	R_{max}	R_p	R_m	S_m	S_k
Капролон	Точение после обработки ПАВ	4,39	11,6	15,2	7,6	5,89	0,88	-0,17
	Точение	7,6	22,72	35,97	14,02	21,95	0,33	0,27
Текстолит	Точение после обработки ПАВ	4,88	21,16	28,80	12,36	8,22	0,15	-0,18
	Точение	10,0	40,53	48,43	26,27	22,16	0,21	0,56

Таблица 2. Результаты снижения шероховатости поверхности при обработке стеклопластика

Table 2. Results of surface roughness reduction when processing fiberglass

Вариант точения	Параметры шероховатости						
	R_a	R_z	R_{max}	R_p	R_m	S_m	S_k
Точение							
Обычное точение	12,61	32,72	30,97	14,02	21,95	0,337	0,976
С предварительной виброобработкой связующего (100 Гц, 60 мкм)	7,505	15,24	20,75	9,232	11,52	0,186	0,600

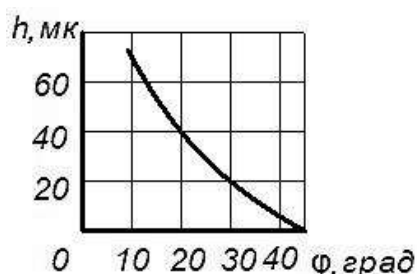


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности от главного угла в плане

Fig. 8. Surface roughness vs main angle in the plan

ширина стружки и уменьшается ее толщина, что способствует усилению вибраций.

Передний угол при резании также оказывает большое влияние на интенсивность вибраций, при увеличении которого интенсивность вибраций снижается (рис. 9) [12–16].

Также вопросы исследования зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента рассматривались в работе [13]. В данной работе получены графики зависимости шероховатости поверхности от значений переднего угла γ при обработке титанового сплава BT22.

Профессорско-преподавательским составом кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного

технического университета большое внимание уделяется вопросу влияния режущего инструмента на качество обработанной поверхности, а именно: в своих работах [17, 18] авторы подробно описывают влияние различных покрытий на режущий инструмент и эффективность механической обработки.

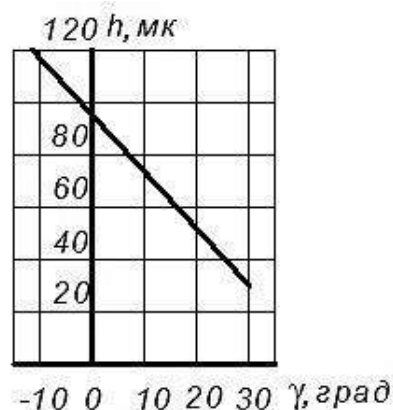


Рис. 9. Зависимость шероховатости поверхности от переднего угла

Fig. 9. Surface roughness vs front angle

Также нельзя забывать об устойчивости всей технологической системы. Вопрос повышения устойчивости процессов механической обработки был и остается актуальным

до настоящего времени. Повышению устойчивости динамики станков огромное внимание уделял отечественный ученый В.А. Кудинов [14–16]. В его работах сказано, что устойчивость динамики станков зависит в первую очередь от жесткости упругой системы станка. Чем больше жесткость, тем выше устойчивость самого процесса, но не всегда.

МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ

Обобщая вышеизложенное можно сказать, что качество обработки (шероховатость) достигается посредством:

- применения рациональных режимов резания;
- изменения геометрии режущего инструмента;
- применения методов, воздействующих на физико-механические свойства обрабатываемых материалов;
- снижения относительных пространственных динамических колебаний инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки.

Из проведенного выше обзора следует, что качество обработки достигается посредством многих факторов. Поэтому с учетом взаимовлияния факторов друг на друга обеспечение качества представляет собой комплексную многофакторную задачу, для решения которой требуется разработка мето-

дики, которая будет учитывать весь комплекс этих взаимовлияний.

Для наглядности представления влияния основных факторов на шероховатость, а также их взаимовлияния между собой, целесообразно представить в виде схемы (рис. 10).

Из представленной схемы, где показаны основные взаимовлияния факторов на качество обработки, очевидно, что нет однозначного решения о приоритете тех или иных факторов при получении шероховатости поверхности. Это обуславливает использование системного подхода к постановке задач, решение которых позволит повысить эффективность обработки для достижения требуемой шероховатости.

Основные задачи – это определение установления количественных взаимовлияний друг на друга факторов, а также их приоритетов в зависимости от различных условий, позволяющих разрабатывать методики по обеспечению требуемой шероховатости при обработке резанием.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет в настоящее время выполнил ряд исследований в этом направлении [19–21], а также ведутся исследования, позволяющие оценивать влияние жесткости инструментальной оснастки на шероховатость обработанной поверхности.

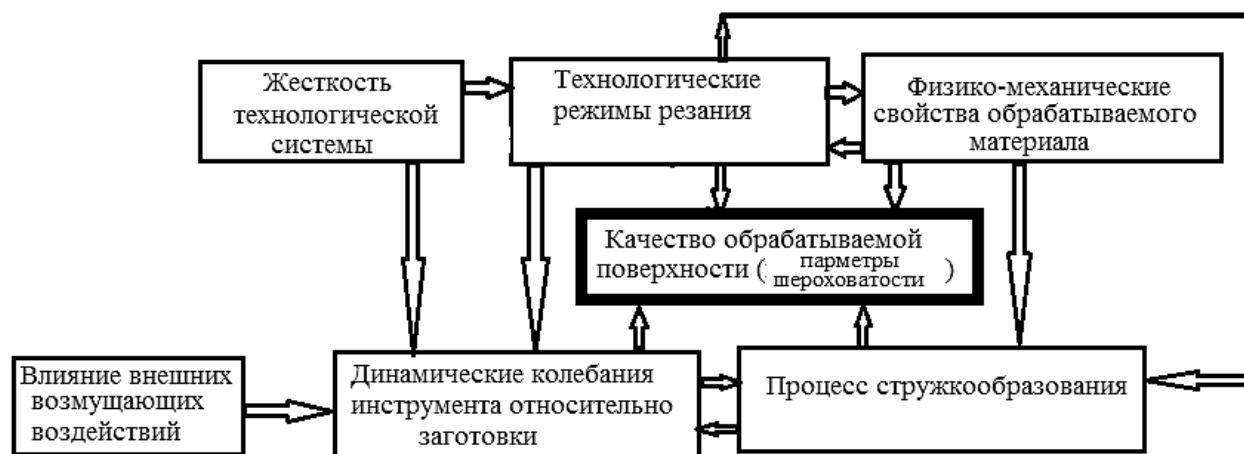


Рис. 10. Схема взаимовлияния факторов на качество обработки
 Fig. 10. Diagram of mutual influence of factors on processing quality



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана схема влияния многофакторных параметров механической обработки на качество обработанной поверхности.
2. Выявлено, что исследований по влия-

нию множества факторов технологической системы на качество обработанной поверхности в полном объеме не проводилось.

3. Предложенная многофакторная схема применима для любого вида механической обработки.

Список литературы

1. Костин П.Н., Лукьянов А.В. Коррекция частоты вращения шпинделя при фрезеровании по данным численного моделирования системы: приспособление-инструмент-заготовка. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 1. Р. 54–62. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-54-62>
2. Гимадеев М.Р., Давыдов В.М. Обеспечение качества поверхности при механообработке сложнопрофильных деталей // *Технология машиностроения*. 2018. № 11. С. 9–16.
3. Гимадеев М.Р., Давыдов В.М. Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом // *Тяжелое машиностроение*. 2018. № 9. С. 24–29.
4. Гимадеев М.Р., Давыдов В.М., Никитенко А.В., Стельмаков В.А. Получение заданных параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании цилиндрических отверстий // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. Серия: Науки о природе и технике. 2016. № I-1. С. 66–72.
5. Клушин М.И. О физических основах сверхскоростного резания. Т. XVII. Вып. 4. Горький: Изд-во ГПИ, 1961. С. 15–22.
6. Клушин М.И. Резание металлов. М.: Изд-во «Машгиз», 1956. 363 с.
7. Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Шпилев А.М., Бурков А.А. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / науч. ред. О.В. Кретинин. Владивосток: Изд-во «Дальнаука», 2000. 195 с.
8. Биленко С.В., Саблин П.А., Леонтьевская Н.К. Использование цветовой пирометрии при измерении температуры стружки при высокоскоростной обработке // *Контроль. Диагностика*. 2013. № 8. С. 37–43.
9. Faassen R.P.H., Van de Wouw N., Oosterling J.A.J., Nijmeijer H. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43. Iss. 14. P. 1437–1446. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00171-8)
10. Еренков О.Ю., Кравченко Е.Г., Верещагина А.С. Исследование шероховатости полимерных материалов после точения заготовок, предварительно обработанных поверхностно-активными веществами // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. Серия: Науки о природе и технике. Машиностроение. 2016. № II-1. С. 23–28. [https://doi.org/10.17084/2016.II-1\(26\).4](https://doi.org/10.17084/2016.II-1(26).4)
11. Еренков О.Ю., Проценко А.Е., Шпилев А.М. Повышение прочности стеклопластика путём вибрационной обработки эпоксидного связующего // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. Серия: Науки о природе и технике. Машиностроение. 2018. № IV-1. С. 94–99. [https://doi.org/10.17084/I-1\(36\).13](https://doi.org/10.17084/I-1(36).13)
12. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках // *Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов*. М.: Изд-во «Машгиз», 1958. С. 15–18.
13. Серебrenникова А.Г., Гурылев В.Б. Титановый сплав BT22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 548–560. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>
14. Кудинов В.А. Автоколебания на низких и высоких частотах (устойчивость движений) при резании // *Станки и инструмент*. 1997. № 10. С. 16–22.
15. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
16. Кудинов В.А., Чуприна В.М. Пузырьковый анализ динамических характеристик упругой системы станка // *Станки и инструмент*. 1989. № 1. С. 8–11.
17. Shvetsov I.V., Mokritskij B.Ya., Malukhina O.A., Rahmonov A.H., Belyakov V.N. Comparative tests of the metal cutting tools performance in the processing of stainless steels // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018. Vol. 441. P. 012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/441/1/012052>
18. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V., et al. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings // *Coatings*. 2018. Vol. 8. Iss. 11. P. 8110395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
19. Саблин П.А., Жигалкин К.А. Динамика сил резания при высокоскоростном фрезеровании // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. Серия: Науки о природе и технике. Машиностроение. 2019. № II-1. С. 41–49. [https://doi.org/10.17084/III-1\(38\).5](https://doi.org/10.17084/III-1(38).5)
20. Космынин А.В., Щетинин В.С., Саблин П.А. Обеспечение качества обработки материалов резанием

посредством внедрения трансформируемых управляемых звеньев в систему станочных систем // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Серия: Науки о природе и технике. Машиностроение. 2020. № V-1. С. 115–118.

21. Саблин П.А., Космынин А.В., Щетинин В.С. Управ-

ляемые шпиндельные опоры как инструмент обеспечения качества обработки. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5. С. 1019–1029. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1019-1029>

References

1. Kostin PN, Lukyanov AV. Spindle rotation speed adjustment when milling by system numerical modeling data: device-tool-workpiece. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):54–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-54-62>
2. Gimadeev MR, Davydov VM. Ensuring quality of a surface when mechanoprocessing figurine details. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2018;11:9–16. (In Russ.)
3. Gimadeev MR, Davydov VM. Correlation of the roughness parameters in milling of spherical tool. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2018;9:24–29. (In Russ.)
4. Gimadeev MR, Davydov VM, Nikitenko AV, Stelmakov VA. Obtaining the desired roughness parameters for drilling and milling a cylindrical bore. *Uchenye zapiski Komso-mol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroenie = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical Engineering*. 2016;I-1:66–72. (In Russ.)
5. Klushin MI. *On physical foundations of ultra high-speed cutting*. Vol. XVII. Iss. 4. Gor'kij: Gorky Polytechnic Institute; 1961, p. 15–22. (In Russ.)
6. Klushin MI. *Metal cutting*. Moscow: Mashgiz; 1956, 363 p. (In Russ.)
7. Kabaldin YuG, Oleynikov AI, Shpiloyv AM, Burkov AA. Mathematical modelling of self-organizing processes in technological systems of cutting process / scientific editor OV Kretinin. Vladivostok: Dal'nauka; 2000, 195 p. (In Russ.)
8. Bilenko SV, Sablin PA, Leontyevskaya NK. Use of color pyrometry at measurement of temperature of shaving at high-speed processing. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2013;8:37–43. (In Russ.)
9. Faassen RPH, Van de Wouw N, Oosterling JAJ, Nijmeijer H. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003;43(14):1437–1446. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00171-8)
10. Erenkov OYu, Kravchenko EG, Vereshchagina AS. The study of polymeric materials roughness after workpieces turning pre-treated with surfactants. *Uchenye zapiski Komso-mol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroenie = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering*. 2016;II-1:23–28. (In Russ.) [https://doi.org/10.17084/2016.II-1\(26\).4](https://doi.org/10.17084/2016.II-1(26).4)
11. Erenkov OYu, Protsenko AE, Shpilev AM. Increasing the strength of fiberglass by means of epoxy binder vibration treatment. *Uchenye zapiski Komso-mol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroenie = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering*. 2018;IV-1:94–99. (In Russ.) [https://doi.org/10.17084/I-1\(36\).13](https://doi.org/10.17084/I-1(36).13)
12. Sokolovskij AP. Vibrations when operating metal-cutting machines. In: *Issledovanie kolebanij metal-lorezhushchih stankov pri rezanii metallov = Research of metal-cutting machine vibrations when cutting metals*. Moscow: Mashgiz; 1958, p. 15–18. (In Russ.)
13. Serebrennikova AG, Gurylyov VB. VT22 titanium alloy: study of the cutting tool geometry effect on output parameters of turning process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(3):548–560. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>
14. Kudinov VA. Self-oscillations at low and high frequencies (motion stability) under cutting. *Stanki i instrument*. 1997;10:16–22. (In Russ.)
15. Kudinov VA. *Machine-tool dynamics*. Moscow: Mashinostroenie; 1967, 360 p. (In Russ.)
16. Kudinov VA, Chuprina VM. Unit-by-unit analysis of dynamic characteristics of machine-tool elastic system. *Stanki i instrument*. 1989;1:8–11. (In Russ.)
17. Shvetsov IV, Mokritskij BYa, Malukhina OA, Rahmonov AH, Belyakov VN. Comparative tests of the metal cutting tools performance in the processing of stainless steels. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;441:012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/441/1/012052>
18. Vereschaka A, Oganyan M, Bublikov Yu, Sitnikov N, Deev K, Pupchin V, et al. In-crease in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered compo-site nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings. *Coatings*. 2018;8(11):8110395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
19. Sablin PA, Zhigalkin KA. Dynamics of cutting forces in high speed milling. *Uchenye zapiski Komso-mol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroenie = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering*. 2019;II-1:41–49. (In Russ.) [https://doi.org/10.17084/III-1\(38\).5](https://doi.org/10.17084/III-1(38).5)
20. Kosmyrin AV, Shchetinin VS, Sablin PA. Ensuring the quality of material processing by cutting through the introduction of transformable controlled links in the system of



machine tools. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike. Mashinostroenie = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences. Mechanical engineering.* 2020;V-1;115–118. (In Russ.)

21. Sablin PA, Kosmynin AV, Shchetinin VS. Controlled spindle supports as a tool for ensuring machining quality. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2020;24(5):1019–1029. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1019-1029>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саблин Павел Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры машиностроения,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
✉ e-mail: ikpmto@knastu.ru

Щетинин Владимир Сергеевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры машиностроения,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
e-mail: schetynin@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 20.10.20; одобрена после рецензирования 18.02.2021; принята к публикации 29.04.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Sablin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur 681013,
Russia;
✉ e-mail: ikpmto@knastu.ru

Vladimir S. Shchetinin,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur 681013,
Russia;
e-mail: schetynin@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 20.10.20; approved after reviewing 18.02.2021; accepted for publication 29.04.2021.



Влияние весовых коэффициентов измерений на согласованность результатов оценивания состояния и расчета установившегося режима электроэнергетической системы

© А.М. Глазунова, И.Н. Колосок

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

Резюме: Цель исследований – разработка метода настройки процедуры оценивания состояния электроэнергетической системы, направленного на повышение качества оценивания состояния путем корректировки весовых коэффициентов измерений. Для решения поставленной задачи используются методы нелинейной оптимизации. Формирование контрольных уравнений и решение системы линейных уравнений при оценивании состояния выполняются методом Краута. Результаты расчета электроэнергетического установившегося режима рассматриваются в качестве эталона. Чем меньше полученные оценки отличаются от результатов расчета установившегося режима, тем выше точность процедуры оценивания состояния. Задача корректировки весовых коэффициентов поставлена и решена как задача нелинейной оптимизации, где в качестве параметров оптимизации принимаются дисперсии измерений. Разработана целевая функция, которая формулируется следующим образом: минимизировать дисперсии оценок измерений, входящих в одно контрольное уравнение, за счет максимизации дисперсий измерений активной мощности в балансирующем узле расчетной схемы электроэнергетической системы. При решении этой задачи контролируются ограничения в виде равенств и неравенств. Задача оптимизации дисперсий решается после первой итерации оценивания состояния, и, начиная со второй итерации, оценивание состояния выполняется с новыми весовыми коэффициентами измерений. Расчеты выполнены на 6-узловой тестовой схеме. Из существующих измерений составляются контрольные уравнения. Данные, относящиеся к измерениям выбранного контрольного уравнения тестовой схемы, используются для расчета целевой функции. Корректность перераспределения дисперсий и их экстремальные значения контролируются ограничениями. Полученные результаты показали, что при корректировке дисперсий измерений оценки мощности во всех узлах становятся ближе к расчету установившегося режима.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, оценивание состояния, весовые коэффициенты, нелинейная минимизация, параметры установившегося режима

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00322.

Для цитирования: Глазунова А.М., Колосок И.Н. Влияние весовых коэффициентов измерений на согласованность результатов оценивания состояния и расчета установившегося режима электроэнергетической системы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 172–182. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-172-182>

Influence of the weight coefficients of measurements on the consistency of the assessment and calculation results of the power supply system steady-state operation conditions

Anna M. Glazunova, Irina N. Kolosok

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of this work is to develop an improved procedure for assessing the state of power supply systems based on adjusting the weight coefficients of measurements. To this end, non-linear optimisation methods were used. The control equations and the solution of the simultaneous linear equations were performed using the Crout method. The results of the calculation of the electrical power steady-state mode were considered as a reference. The lower the difference between the evaluation and steady-state calculation results, the higher the accuracy of the overall state assessment procedure. The problem of correcting the weight factors is set and solved as a nonlinear optimisation problem,

where the optimisation parameters are taken as the dispersion of the measurements. The objective function was formulated as follows: to minimise the measurement evaluation dispersions that are part of a single control equation by maximising the active power measurements dispersion in the swing bus of the power supply system. In this study, limitations in the form of equation and inequality are monitored. The problem of optimising the dispersions is solved after the first iteration of the state assessment; starting with the second iteration, the state assessment is performed with new measurement weight factors. The calculations were performed on a 6-node test circuit. The control equations are drawn from the current measurements. The measurements data on the selected control equation of the test circuit are used to calculate the target function. The accuracy of the dispersions redistribution and their extreme values are controlled by the limitations. The results showed that, when adjusting the dispersion of measurements, the power assessments at all nodes are closer to the steady-state mode calculation results.

Keywords: electric power grid, state estimation, weighting coefficients, nonlinear minimization, steady-state parameters

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment project (no. FWEU-2021-0001) of the fundamental research program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project no. 19-07-00322.

For citation: Glazunova AM, Kolosok IN. Influence of the weight coefficients of measurements on the consistency of the assessment and calculation results of the power supply system steady-state operation conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):172–182. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-172-182>

ВВЕДЕНИЕ

Расчет текущего установившегося режима по заданным или измеренным параметрам режима является ключевой функцией комплекса задач оперативного и противоаварийного управления электроэнергетической системы (ЭЭС) [1]. Основными методами, используемыми для расчета текущего режима ЭЭС, являются методы расчета установившегося режима (УР) и методы оценивания состояния (ОС). Далее рассмотрены основные сходства и различия между задачей ОС и расчетом УР. При решении обеих задач используется одна и та же схема замещения сети и одна и та же математическая модель ЭЭС, записанная в виде уравнений потоко-распределения, удовлетворяющих законам Ома и Кирхгофа для электрической сети. Результатом решения обеих задач является расчетная модель ЭЭС.

Основное различие состоит в требуемом объеме измерительной информации. Для расчета УР необходимо, чтобы по имеющимся измерениям можно было рассчитать вектор зависимых параметров режима, обычно это комплексы узловых напряжений во всех узлах (кроме балансирующих) и инъекции мощностей в балансирующих узлах. В качестве измерений в задаче расчета УР используются значения узловых инъекций активной, реактивной мощностей и напряжения в ба-

лансирующих узлах. Теория и методы расчета УР начали разрабатываться достаточно давно – в середине прошлого века [2, 3], когда еще не было телеметрии, поэтому для задания этих параметров использовались данные контрольных замеров, скорректированные с учетом даты выполнения расчетов, данные суточной ведомости и другая подобная информация.

С созданием автоматизированной системы диспетчерского управления в 70-х годах прошлого века и с внедрением телеметрии [4] появились измерения различных параметров режима ЭЭС: перетоки активной, реактивной мощностей, токи в линиях, модули узловых напряжений, мощности генерирующих источников и т.д. Наличие возможности использовать различные измерения для расчета текущего режима ЭЭС привело к развитию методов ОС [5, 6]. При ОС вектор параметров режима, по которому вычисляются все остальные параметры режима, получил название вектора состояния: $x = \{U, \delta\}$, его размерность равна $2n-1$, где n – количество узлов в расчетной схеме. Минимально необходимый набор измерений, необходимый для расчета всех компонент вектора состояния, называется базисным. Несмотря на то, что в этих условиях для расчета УР появилась возможность частично использовать телеизмерения, расчет по базисным измерениям не



позволяет отфильтровать погрешности и обнаружить ошибочные измерения, что при плохом качестве измерений может привести к заметному искажению расчетных параметров режима.

Оценивание состояния – одна из основных задач подсистемы оперативного управления режимами, используемая для расчета текущего режима ЭЭС по данным измерений. В качестве измерений при решении задачи ОС используются телеизмерения (ТИ) и телесигналы, поступающие от SCADA-систем (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition – система диспетчерского контроля и сбора данных реального времени), и измерения комплексных электрических величин от устройств синхронизированных векторных измерений (СВИ) – измерительного оборудования системы мониторинга переходных режимов [7]. При решении задачи ОС, как правило, присутствует «избыточность» измерений, это означает, что количество используемых измерений больше базисного, и оно позволяет отфильтровать погрешности измерений, обнаружить в них грубые ошибки, в результате чего полученный расчетный режим точнее отражает текущее состояние ЭЭС.

Одним из первых методов, предложенных для решения задачи ОС, был метод взвешенных наименьших квадратов [8, 9]. Для реализации этого метода требуется задавать весовые коэффициенты измерений. Появившиеся позже методы – метод наименьших модулей [10], методы робастного ОС [11, 12] – также требуют задания весовых коэффициентов.

В одной из первых монографий по ОС [13] весовые коэффициенты трактовались как степень «доверия» к измерениям и определялись эмпирически, исходя из данных о практическом использовании измерений. С появлением информации о погрешностях ТИ весовые коэффициенты стали задавать равными обратным дисперсиям измерений значениями, принимая закон о нормальном распределении погрешностей. Данные о точности измерений, как правило, неизвестны или задаются приближенно, исходя из номинальных метрологических характеристик измери-

тельного тракта. Они могут изменяться в реальных условиях, поэтому были разработаны алгоритмы идентификации дисперсий измерений, позволяющие уточнить их при функционировании задачи ОС в циклическом режиме [14].

Еще одно различие между задачами расчета УР и ОС состоит в задании балансирующих узлов. В задаче расчета УР балансирующие узлы – это узлы, в которых остаются постоянными фаза или/и модуль напряжения, а небалансы (активные и реактивные), возникающие, например, из-за плохого исходного приближения, распределяются между балансирующими узлами. В задаче ОС балансирующие узлы не задаются, для фиксации степеней свободы задается базисный узел, в котором фиксируется фазовый угол напряжения, поэтому количество компонент вектора состояния равно $2n-1$, а погрешности измерений узловых инъекций распределяются между всеми параметрами режима в соответствии с весовыми коэффициентами. При изменении весовых коэффициентов изменяются величины параметров режима, полученные в результате ОС. При этом важны не сами значения весовых коэффициентов, а их соотношения: чем выше коэффициент измеренного параметра режима по сравнению с весовыми коэффициентами других измерений, тем ближе оценка этого параметра к самому измерению, и наоборот. Таким образом можно добиться высокой точности оценок наиболее ответственных параметров режима, например, перетоков по межсистемным связям, или фиксировать значения абсолютно точных параметров, задавая им нулевые или очень малые дисперсии.

В практике диспетчерского управления нередко возникают ситуации, когда требуется максимальное совпадение результатов ОС, полученных при обработке избыточного набора измерений, и результатов расчета УР. В данной работе для достижения этой цели предложен алгоритм настройки весовых коэффициентов при решении задачи ОС методом контрольных уравнений [15].

Целью данной работы является исследование возможности получения результатов оценивания состояния идентичных результа-

там расчета УР за счет регулирования весовых коэффициентов измерений.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Вычисления параметров установившегося режима ЭЭС выполняются двумя методами:

- расчет потокораспределения, когда в качестве независимых переменных во всех узлах, кроме балансирующих, используются инъекции (детерминированная информация);
- оценивание состояния, когда в качестве независимых переменных используются измерения (стохастическая информация).

Как правило, результаты, полученные по двум методам, не совпадают друг с другом. Одной из причин этого является разный характер исходной информации (детерминистический и стохастический). При внедрении в ЭЭС датчиков синхронизированных векторных измерений (СВИ), а также при повышении точности измерений SCADA качество стохастической информации приближается к детерминистической, и при отсутствии избыточных измерений данный аргумент перестает быть решающим. В настоящее время существует много работ, посвященных проблеме повышения точности результатов ОС за счет совместного использования измерений SCADA-системы и векторных измерений [16, 17]. Кроме этого, для улучшения качества ОС разрабатываются методы обнаружения ошибочных данных [18, 19].

Другой причиной несовпадения результатов является разный смысл балансирующих узлов. В задаче ОС балансирующий узел – это узел, в котором остаются постоянными модуль и фаза напряжения, а погрешности измерений распределяются между всеми параметрами режима в соответствии с весовыми коэффициентами. При расчете УР балансирующими узлами являются узлы, в которых остаются постоянными фаза или/и модуль напряжения, а небалансы распределяются между балансирующими узлами.

В ЭЭС выделяются электрические станции, которые отвечают за баланс мощности в системе, и при расчете УР обычно эти узлы назначаются балансирующими. Поэтому распределение мощностей, требующихся для сохранения балансов в системе, в зада-

че расчета УР представляется более правильным.

В работе выполняется сравнительный анализ параметров установившегося режима, полученных разными методами при прочих равных условиях. Под равными условиями понимается использование одинаковых исходных данных: параметров схемы замещения, параметров режима. В качестве независимых переменных (инъекций) в задаче расчета УР принимаются измерения инъекций, полученные от SCADA-системы и СВИ.

ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ С КОРРЕКТИРОВКОЙ ПОЛУЧЕННЫХ ОЦЕНОК

На рис. 1 показана укрупненная блок-схема решения задачи ОС с корректировкой полученных оценок. Сначала формируются вектор измерений, матрица весовых коэффициентов и другие данные, необходимые для ОС. По окончании формирования требующихся данных начинается процесс ОС, где после первой итерации вычисляются коэффициенты линеаризации и невязки контрольных уравнений. Эти данные используются для формирования целевой функции (критерия оптимизации) и ограничений. Следующим шагом алгоритма является решение задачи оптимизации дисперсий измерений. По получению результатов оптимизации процесс ОС продолжается с новыми значениями весовых коэффициентов.

Решение данной задачи может быть представлено тремя блоками:

1. Подготовка исходной информации.
2. Оптимизация весовых коэффициентов измерений с целью получения желаемого режима.
3. Оценивание состояния.

Подготовка исходной информации. В данной работе под подготовкой исходной информации понимается *формирование информации о параметрах режима*, которая в задаче оценивания состояния представляется в виде вектора измерений:

$$\bar{y} = (U_i, P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}, \delta_i), \quad (1)$$



Рис. 1. Укрупненная блок-схема
Fig. 1. Enlarged block diagram

где U_i – модуль напряжения; P_i , Q_i – инъекции активных и реактивных мощностей в узлах; P_{ij} , Q_{ij} – перетоки мощностей в трансформаторах и линиях; δ_i – фазы напряжений в тех узлах схемы, где установлены регистраторы СВИ.

Вычисление невязок контрольных уравнений. Задача ОС решается методом контрольных уравнений, где для решений систем нелинейных и линейных уравнений применяются методы Ньютона и Краута. Процесс формирования КУ основан на теореме о единственности представления каждого вектора n -мерного пространства E_n в виде линейной комбинации векторов базиса [20]. В результате преобразования прямо-

угольной матрицы Якоби (Н) методом Краута все измерения делятся на избыточные и базисные. Избыточные измерения представляются в виде комбинации базисных измерений, поэтому все базисные измерения входят во все КУ с разными коэффициентами линеаризации. Эта особенность формирования КУ используется при формировании критерия оптимизации для решения поставленной задачи.

Вычисление коэффициентов линеаризации. Коэффициент для i -го измерения вычисляется по формуле:

$$a_i = \frac{\partial w_k}{\partial y_i}, \quad (2)$$

где k – номер КУ.

Процесс вычисления невязок КУ и коэффициентов линеаризации подробно описан в [15].

Оптимизация дисперсий измерений. Целевая функция в задаче оптимизации формулируется следующим образом: минимизировать дисперсии оценок измеренных параметров режима, объединенных одним КУ, за счет максимизации дисперсии измерения активной мощности в балансирующем узле при ограничениях в виде равенств и неравенств. Для представления целевой функции в математическом виде применяется правило, которое гласит, что дисперсия КУ равна сумме дисперсий измерений, входящих в данное КУ с учетом коэффициентов линеаризации [15].

Целевая функция записывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{n-1} a_i^2 \sigma_i^2 - a_b^2 \sigma_b^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где n – число измерений в КУ; $a_i = \frac{\partial w}{\partial y}$ – коэффициент линеаризации; b – балансирующий узел.

Ограничение в виде равенства отвечает за соблюдение границы величины дисперсии КУ с учетом коэффициента линеаризации и имеет вид:

$$\sigma_{i(o)}^2 a_i (\sum_{j=1}^m \sigma_{j(o)}^2 a_j^2)^{-1} - B_{КУ} = 0, \quad (4)$$

где m – количество измерений в КУ; $\sigma_{i(o)}^2$ – результат оптимизации; $B_{КУ}$ вычисляется по первому слагаемому (4) при заданных значениях дисперсий. Первое слагаемое уравнения (4) является частью формулы, выведенной в [15] для вычисления оценок, и отвечает за пропорции, по которым распределяется невязка КУ между измерениями.

Ограничения в виде неравенств накладываются на параметры оптимизации:

$$0 \leq \sigma_i^2 \leq \sigma_{raw(i)}^2; \quad (5)$$

$$0,5\sigma_{raw(b)}^2 \leq \sigma_b^2 \leq \sigma_{raw(b)}^2, \quad (6)$$

где $\sigma_{raw(i)}^2$ – заданная дисперсия i -го измерения;

$\sigma_{raw(b)}^2$ – заданная дисперсия измерения мощности в балансирующем узле.

Результатом решения этой задачи являются новые значения весовых коэффициентов измерений.

Решение задачи оценивания состояния. Задача ОС решается с весовыми коэффициентами измерений, вычисленными в процессе оптимизации.

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для сравнительного анализа результатов разработаны формулы, которые показывают точность оценок, полученных в процессе ОС и ОС с корректировкой результатов. В качестве эталона рассматриваются истинные значения параметров режима (результат УР).

Отклонения оценок от истинных значений вычисляются по формуле:

$$err_i^{(И(К))} = y_{ист(i)} - \hat{y}_{(i)}, \quad (7)$$

где индекс И (К) указывает, что значения отклонений вычисляются для ОС и для ОС с корректировкой весовых коэффициентов измерений.

Среднее значение отклонений вычисляется по формуле:

$$E_{sum}^{(И(К))} = \sum_i^n (err_i) / n, \quad (8)$$

где n – количество узлов.

Показатель повышения точности результатов ОС с корректировкой вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{ОС} = E_{sum}^{И} - E_{sum}^{К}. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходная информация и алгоритм решения. Исследования проводились на 6-узловой схеме (рис. 2) с разным составом измерений. В работе рассмотрены два сценария. В обоих сценариях балансирующим узлом является узел номер 6. Количество параметров оптимизации равно 11.

Целью исследования является определение максимальной точности оценок инъекций

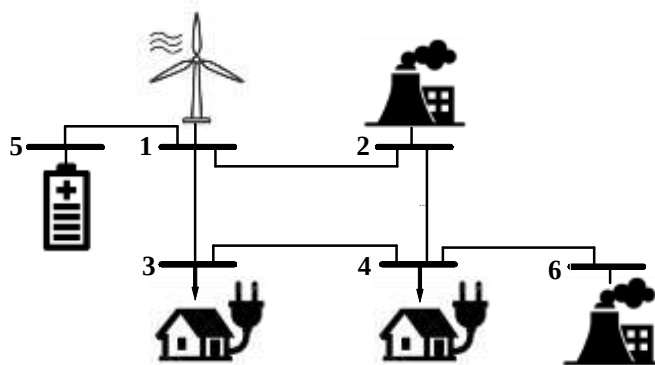


Рис. 2. Тестовая схема
Fig. 2. Test circuit

во всех узлах за счет корректировки весовых коэффициентов измерений. При этом погрешность оценки всех измеренных параметров режима не должна превышать погрешности измерительного тракта.

Сценарий 1. Исходная информация – это измерения 12 параметров режима: $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$. В данном случае два измерения избыточные, что позволяет сформировать два КУ.

В процессе линеаризации нелинейных уравнений по методу Краута избыточными измерениями оказываются P_5, Q_1 . Для решения задачи оптимизации весовых коэффициентов используется КУ № 1, в которое входит измерение инъекции активной мощности P_5 .

Сценарий 2. Исходная информация – это измерения 16 параметров режима: $U_1, U_3, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_{1-2}, P_{4-3}$. В данном случае шесть измерений являются избыточными, что позволяет сформировать шесть КУ.

В процессе линеаризации нелинейных уравнений по методу Краута избыточными измерениями оказываются $P_1, P_4, P_{4-3}, Q_1, Q_3, Q_4$. Для решения задачи оптимизации весовых коэффициентов используется КУ № 2, в которое входит измерение инъекции активной мощности P_4 .

Задача корректировки весовых коэффициентов решается по следующему алгоритму:

1. Выбирается КУ, в которое входит наибольшее количество измерений активной мощности в узлах, включая измерение инъекции в балансирующем узле.

2. Составляется целевая функция из данных, характеризующих измерения выбранного КУ. Целевая функция имеет вид для сценария 1:

$$\sum_2^n a_{Q(i)}^2 \sigma_{Q(i)}^2 + a_{P2}^2 \sigma_{P2}^2 + a_{P3}^2 \sigma_{P3}^2 + a_{P4}^2 \sigma_{P4}^2 + a_{P5}^2 \sigma_{P5}^2 - a_{P6}^2 \sigma_{P6}^2 + a_{P1}^2 \sigma_{P1}^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

Для сценария 2:

$$\sum a_{Q(i)}^2 \sigma_{Q(i)}^2 + \sum a_{U(l)}^2 \sigma_{U(l)}^2 + \sum a_{P(j)}^2 \sigma_{P(j)}^2 + a_{P2-4}^2 \sigma_{P2-4}^2 - a_{P6}^2 \sigma_{P6}^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $i = 2, 5, 6; l = 1, 3; j = 1, 2, 3, 5$.

3. Вычисляется $B_{КУ}$.

4. Формируются ограничения. Ограничение в виде равенства имеет вид (4), где i – это номер измерения в КУ; j – это номера измерений, входящих в КУ. Например, для P_6 ограничение (4) имеет вид:

$$\sigma_{6(o)}^2 a_6 (\sum_{j=1}^m \sigma_{j(o)}^2 a_j^2)^{-1} - B_{КУ} = 0, \quad (12)$$

где $j = 1 \div 11$.

Ограничения в виде неравенств (6) учитываются при задании условий для параметров оптимизации. Задаются минимальные и максимальные значения дисперсий.

5. Решается задача оптимизации с помощью имеющегося в MATLAB приложения `fmincon`.

Полученные результаты. В табл. 1 показаны значения параметров оптимизации до и после оптимизации для сценария 1. В первой строке записаны дисперсии измерений

Таблица 1. Параметры оптимизации (сценарий 1)
Table 1. Optimization parameters (Scenario 1)

Измерение	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	P_1	P_2	P_3	P_4	P_6
До оптимизации	5	5	5	5	5	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
После оптимизации	1,7	1,8	1,7	1,7	1,7	0,4	0,4	0,4	0,4	5

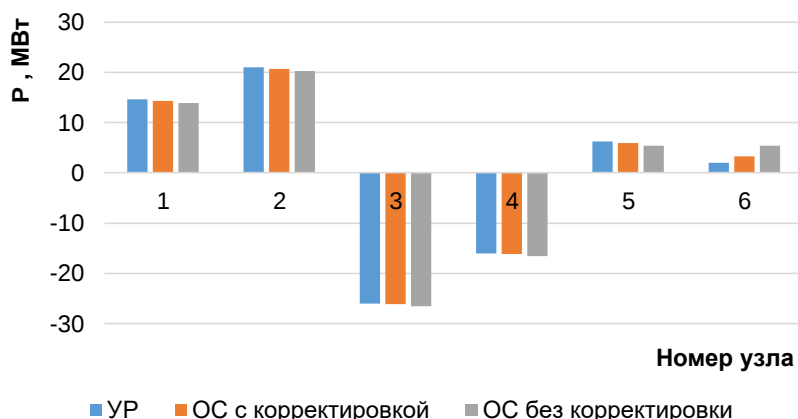


Рис. 3. Значения активных мощностей в трех режимах (сценарий 1)
Fig. 3. Active power values in three modes (Scenario 1)

КУ до оптимизации, во второй строке представлены результаты оптимизации.

На рис. 3 показаны значения активных мощностей в трех режимах: УР, ОС с коррективкой, ОС без коррективки.

Анализ результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 3 показывает, что при увеличении дисперсии измерения в балансирующем узле оценки мощности во всех узлах становятся точнее. Это доказывает, что при задании весовых коэффициентов важным является не абсолютное значение коэффициентов, а их соотношения.

В табл. 2 показаны значения отклонений активных мощностей от истинных значений, вычисленные по (7) без и с коррективкой весовых коэффициентов измерений.

Таблица 2. Значения отклонений без и с коррективкой весовых коэффициентов

Table 2. Deviation values without and with weighting coefficient adjustment

Номер узла	Без коррективки	С коррективкой
1	-0,7794	-0,3187
2	-0,5129	-0,3105
3	-0,7599	-0,2196
4	-0,5498	-0,2305
5	-0,7881	-0,2417
6	3,3409	1,2757

В табл. 3 показаны средние значения отклонений, вычисленные по (8), и показатель $\varphi_{ур}$.

Таблица 3. Средние значения отклонений
Table 3. Average deviation values

Номер узла	Без коррективки	С коррективкой	$\varphi_{ур}$
Сценарий 1	1,1218	0,4326	0,69
Сценарий 2	1,14	1,09	0,05

Из табл. 2, 3 видно, что:

- 1) после коррективки весовых коэффициентов отклонения становятся меньше;
- 2) для сценария 1, когда измерения активной мощности во всех узлах входят в целевую функцию, $\varphi_{ур}$ больше, чем для сценария 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены вопросы повышения точности результатов ОС за счет подбора весовых коэффициентов измерений. Описана особенность формирования контрольных уравнений в задаче оценивания состояния ЭЭС, где для решения системы линейных уравнений используется метод Краута. Показано, что при наличии измерений актив-



ной и реактивной мощности во всех узлах и при отсутствии других измерений все измерения объединяются двумя КУ. Использование КУ, объединяющего измерения активной мощности во всех узлах, упрощает регулирование соотношений между весовыми коэффициентами этих измерений, так как изменение одного весового коэффициента влияет на точность оценок практически всех измерений.

Предложен метод увеличения точности результатов оценивания состояния ЭЭС, основанный на оптимальном подборе весовых коэффициентов измерений. Разработаны

целевая функция и ограничения для оптимизации дисперсий измерений.

Выполнены расчеты на 6-узловой тестовой схеме по двум сценариям, которые отличаются друг от друга составом измерений. Выполненные расчеты показывают, что при использовании КУ, объединяющего измерения активной мощности во всех узлах, оценки инъекции активной мощности становятся точнее на 0,69 МВт. Использование КУ, объединяющего разные измерения, повышает точность оценок инъекции активной мощности на 0,05 МВт.

Список литературы

1. Аюев Б.И., Машалов Е.В., Неуймин В.Г., Шубин Н.Г. Основные технологические задачи Системного оператора // Вестник Уральского государственного технического университета. 2004. Т. 12. № 42. С. 27–30.
2. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 190 с.
3. Крумм Л.А. Методы приведенного градиента при управлении электроэнергетическими системами. Новосибирск: Изд-во «Наука», 1977. 368 с.
4. Лисицын Н.В., Морозов Ф.Я., Окин А.А., Семенов В.А. Единая энергосистема России. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 282 с.
5. Schweppe F.C., Wildes J. Power system static-state estimation. Part I: Exact Model // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1970. Vol. PAS-89. Iss. 1. P. 120–125. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292678>
6. Гамм А.З. Оценка текущего состояния электроэнергетической системы как задача нелинейного программирования // Электричество. 1972. № 9. С. 1–7.
7. Гамм А.З., Глазунова А.М., Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы // Электричество. 2009. № 6. С. 41–49.
8. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
9. Abur A., Exposito A.G. Power system state estimation – theory and implementation. Part 2. New York: Marcel Dekker, 2004. P. 9–26.
10. Abur A., Celik M.K. A fast algorithm for the weighted least absolute value state estimation // IEEE Power Engineering Review. 1991. Vol. 11. Iss. 2. P. 41. <https://doi.org/10.1109/MPER.1991.88711>
11. Mili I., Cheniae M.G., Vichare N.S., Rousseeuw P.J. Robust state estimation based on projection statistics (of power systems) // IEEE Transactions on Power Systems. 1996. Vol. 11. Iss. 2. P. 1118–1127. <https://doi.org/10.1109/59.496203>
12. Хохлов М.В. Пороговые свойства робастного оценивания состояния электроэнергетических систем // Электричество. 2010. № 4. С. 2–12.
13. Гамм А.З., Герасимов Л.Н., Гришин Ю.А., Колосок И.Н. Оценивание состояния в электроэнергетике / под ред. Ю.Н. Руденко. М.: Изд-во «Наука», 1983. 320 с.
14. Гамм А.З., Глазунова А.М., Колосок И.Н., Овчинников В.В. Методы оценки дисперсий телеизмерений в электроэнергетических системах // Электричество. 1997. № 7. С. 2–9.
15. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах / отв. ред. В.И. Зоркальцев. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2000. 152 с.
16. Rathod N., Patel H., Joshi S. Implementing two stage hybrid state estimation with various approaches // International Conference on Smart Grids and Energy Systems (Perth, 23–26 November, 2020). Perth: IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00117>
17. Massignan J.A.D., London J.B.A., Maciel C.D., Besani M. PMUs and SCADA measurements in power system state estimation through Bayesian inference // IEEE Milan PowerTech (Milan, 23–27 June 2019). Milan: IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810750>
18. Ren P., Abur A. Modification of boundary zone measurements to avoid spreading of errors // IEEE Eindhoven PowerTech (Eindhoven, 29 June – 2 July 2015). Eindhoven: IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232282>
19. Glazunova A., Kolosok I., Semshchikov E. Bad data detection by dynamic state estimation for the case of low redundancy of measurements // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (13–16 May 2014). Cavtat: IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850459>
20. Демидович Б.П., Марон И.А., Основы вычислительной математики. М.: Изд-во «Наука». Главная ред. физ.-мат. лит.-ры, 1966. 658 с.

References

1. Ayuev BI, Mashalov EV, Neujmin VG, Shubin NG. Main technological tasks of system operator. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004;12(42):27–30. (In Russ.)
2. Idel'chik VI. *Calculations and optimization of modes of electrical networks and systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1988, 190 p. (In Russ.)
3. Krumm LA. *Reduced gradient methods for electric power system control*. Novosibirsk: Nauka; 1977, 368 p. (In Russ.)
4. Lisicyn NV, Morozov FYa, Okin AA, Semenov VA. *Unified energy system of Russia*. Moscow: National Research University; 1999, 282 p. (In Russ.)
5. Schweppe FC, Wildes J. Power system static-state estimation. Part I: Exact Model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1970;PAS-89(1):120–125. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292678>
6. Gamm AZ. Estimation of electric power system current state as a nonlinear programming problem. *Elektrichestvo*. 1972;9:1–7. (In Russ.)
7. Gamm AZ, Glazunova AM, Grishin YuA, Kolosok IN, Korkina ES. Development of assessment algorithms for electric power system state. *Elektrichestvo*. 2009;6:41–49. (In Russ.)
8. Gamm AZ. *Statistical methods for assessing the state of electric power systems*. State Moscow: Nauka; 1976, 220 p. (In Russ.)
9. Abur A, Exposito AG. *Power system state estimation – theory and implementation*. Part 2. New York: Marcel Dekker; 2004, p. 9–26.
10. Abur A, Celik MK. A fast algorithm for the weighted least absolute value state estimation. *IEEE Power Engineering Review*. 1991;11(2):41. <https://doi.org/10.1109/MPER.1991.88711>
11. Mili I, Cheniae MG, Vichare NS, Rousseeuw PJ. Robust state estimation based on projection statistics (of power systems). *IEEE Transactions on Power Systems*. 1996;11(2):1118–1127. <https://doi.org/10.1109/59.496203>
12. Hohlov MV. Threshold features of robust estimation of electric power system state. *Elektrichestvo*. 2010;4:2–12. (In Russ.)
13. Gamm AZ, Gerasimov LN, Grishin YuA, Kolosok IN. *State assessment in electric power industry* / ed. YuN Rudenko. Moscow: Nauka; 1983, 320 p. (In Russ.)
14. Gamm AZ, Glazunova AM, Kolosok IN, Ovchinnikov VV. Estimation methods of telemetry measurement dispersion in electric power grids. *Elektrichestvo*. 1997;7:2–9. (In Russ.)
15. Gamm AZ, Kolosok IN. *Detection of gross errors of telemetry in electric power grids*. / editor-in-chief VI Zorkaltsev. Novosibirsk: Nauka; 2000, 152 p. (In Russ.)
16. Rathod N, Patel H, Joshi S. Implementing two stage hybrid state estimation with various approaches. In: *International Conference on Smart Grids and Energy Systems* 23–26 November, 2020, Perth. Perth: IEEE; 2020. <https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00117>
17. Massignan JAD, London JBA, Maciel CD, Bessani M. PMUs and SCADA measurements in power system state estimation through Bayesian inference. In: *IEEE Milan PowerTech*. 23–27 June 2019, Milan. Milan: IEEE; 2019. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810750>
18. Ren P, Abur A. Modification of boundary zone measurements to avoid spreading of errors. In: *IEEE Eindhoven PowerTech*. 29 June – 2 July 2015, Eindhoven. Eindhoven: IEEE; 2015. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232282>
19. Glazunova A, Kolosok I, Semshchikov E. Bad data detection by dynamic state estimation for the case of low redundancy of measurements. In: *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering*. 13–16 May 2014, Cavtat. Cavtat: IEEE; 2017. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850459>
20. Demidovich BP, Maron IA. *Fundamentals of computational mathematics*. Moscow: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury; 1966, 658 p. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глазунова Анна Михайловна,
доктор технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
Отдела электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: glazunova@isem.irk.ru

Колосок Ирина Николаевна,
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
Отдела электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: kolosok@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna M. Glazunova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Institute of Energy Systems SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
✉ e-mail: glazunova@isem.irk.ru

Irina N. Kolosok,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Researcher of the Department of Electric Power
Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: kolosok@isem.irk.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 22.02.2021; одобрена после рецензирования 25.03.2021; принята к публикации 29.04.2021.

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 22.02.2021; approved after reviewing 25.03.2021; accepted for publication 29.04.2021.



Исследования на основе математического моделирования энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «Байкальская Энергетическая Компания» для оценки эффективности его модернизации

Ф.В. Забуга***, В.Э. Алексеюк*

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

**ООО «Байкальская Энергетическая Компания», Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследование изменения схемы слива дренажей регенерации низкого давления на энергетическую и экономическую эффективность работы энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «Байкальская Энергетическая Компания». В исследованиях используется настроенная по результатам замеров математическая модель энергоблока. Математическое моделирование исследуемого энергоблока производилось в программно-вычислительном комплексе «Система машинного построения программ». Построенная математическая модель теплоэнергетической установки настраивалась с учетом текущего состояния объекта исследования в соответствии с трехэтапной методикой идентификации параметров математических моделей. Предложена тепловая схема энергоблока, согласно которой три потока дренажей низкого давления перенаправлены на всас дренажного насоса подогревателя низкого давления. Модернизированная математическая модель энергоблока позволяет производить расчет параметров установки для действующей и предложенной тепловых схем. Согласно расчетам модели, разница температур основного конденсата за подогревателем низкого давления № 1 и исследуемых дренажей после смешения минимальна и составляет 3,2°C. По результатам выполненных расчетов для действующей и измененной тепловых схем энергоблока установлено, что предложенная модернизация повышает энергетический КПД энергоблока на 0,007% в номинальном режиме работы. Также снижается на 0,052 г.у./кВт·ч удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии. Эксплуатационные расходы на внедрение предложенных технических решений составили 34191 руб. Учитывая годовой коэффициент экстенсивного использования энергоблока, срок окупаемости предлагаемой модернизации схемы составит 5,5 мес., а экономия средств за первый год эксплуатации с учетом окупаемости капиталовложений и затрат на амортизацию – 18423 руб. Предложенный подход, объединяющий аппарат математического моделирования действующих энергоустановок с методикой повышения эффективности принятия технических решений, является универсальным и может применяться для модернизации теплоэнергетических и других установок.

Ключевые слова: угольный энергоблок, повышение эффективности, техническое решение, математическое моделирование, конденсационная установка, тепловой поток

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

Для цитирования: Забуга Ф.В., Алексеюк В.Э. Исследования на основе математического моделирования энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «Байкальская Энергетическая Компания» для оценки эффективности его модернизации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 183–195. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-183-195>

Mathematical modelling of the CHP plant-10 power unit No 5 of “Baikal Energy Company” LLC to assess the efficiency of its modernisation

Fedor V. Zabuga***, Vitaliy E. Alekseyuk*

*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

**Baikal Energy Company LLC, Irkutsk, Russia

Abstract: The work aims to study the effect of changes in the drain scheme of the low-pressure regeneration on the energy and economic efficiency of the CHP plant-10 power unit No 5 of “Baikal Energy Company” LLC. In this study, we used a mathematical model of the power unit adjusted to the measurements results. The mathematical modelling of the

power unit was performed using the "Computer-assisted programming system" application package. The created mathematical model of the heat and power plant was tailored to the current state of the study object according to the three-stage identification procedure of the mathematical model parameters. We proposed a cycle arrangement under which three streams of the low-pressure drainages were redirected to the pump suction of the low-pressure heater. The improved mathematical model of the power unit allows the calculation of the parameters of both the existing and proposed cycle arrangements. According to the calculations, the temperature difference between the main condensate after the low-pressure heater 1 and the investigated drains after mixing is minimal and amounts to 3.2°C. The suggested modernisation increases the energy efficiency of the power unit by 0.007% under the nominal operating conditions of the existing and proposed thermal circuit. In addition, the specific standard fuel consumption for electric generation is reduced by 0.052 g.s.s.f./kW·h. The operating costs to implement the proposed engineering solutions amounted to 34,191 roubles. Considering the annual power plant extensive consumption factor, the payback period of the proposed modernisation will be 5.5 months. The savings for the first operation year are estimated at 18,423 roubles, based on the rate of return and depreciation expenses. The proposed approach combines mathematical modelling of operating power plants with a technique of increasing the efficiency of technical decision-making. The proposed versatile approach can be used for the modernisation of CHPs and other plants.

Keywords: coal-fired power unit, efficiency improvement, technical solution, mathematical modeling, condensing unit, heat flow

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the draft state task (no. FWEU-2021-0005) of the program of basic research of the Russian Federation for the period from 2021 till 2030.

For citation: Zabuga FV, Alekseyuk VE. Mathematical modelling of the CHP plant-10 power unit No 5 of "Baikal energy company" LLC to assess the efficiency of its modernisation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):183–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-183-195>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности использования сжигаемого топлива на электростанциях является одной из важнейших задач, стоящих перед современной энергетикой. В настоящее время продолжают эксплуатироваться теплоэнергетические установки, спроектированные и введенные в эксплуатацию в середине прошлого века. Принятые в то время технические решения зачастую не отвечают современным требованиям, обусловленным сложившимся соотношением между ценами на топливо и оборудованием. По этой причине на многих ТЭС имеются значительные резервы по экономии топливно-энергетических ресурсов. Вскрытие этих резервов и разработка наиболее эффективных режимов работы ТЭС возможны на базе комплексных исследований энергетического оборудования для реальных условий его эксплуатации. Для решения данной задачи может быть весьма эффективным совместное применение методики комплексного анализа эффективности технических решений [1] и методов математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации [2]. Принципиальные преимущества математических моделей, такие как возможность

быстро, точно и многократно решать задачу при различных предположениях, оперативно вносить изменения в методику расчета и другие, предопределили широкое их распространение при разработке и проектировании источников электрической и тепловой энергии.

В конденсаторы паротурбинных установок (ПТУ), помимо потока пара, расширяющегося в части низкого давления, поступают дополнительные пароводяные потоки, имеющие более высокую температуру, чем температура конденсации пара в конденсаторе. Избыточное тепло этих потоков отводится с охлаждающей водой и не применяется с пользой. К этим потокам относятся рециркуляция основного конденсата, дренажи отборов и цилиндров турбины, отсос паровоздушной смеси и слив конденсата из подогревателей, уплотнений цилиндров низкого давления и т.д. [3].

Данная проблема была подробно исследована в работах [4, 5]. Авторы приходят к выводу, что расчетное значение расхода тепла, например, с рециркуляцией основного конденсата для теплофикационных турбин мощностью 50–200 МВт, составляет 2,5–7 МВт, а фактический уровень указанного рас-



хода тепла в реальных условиях эксплуатации превышает расчетное значение в 1,5–2,5 раза. Общее же количество поступающего в конденсатор тепла, помимо части низкого давления, составляет 8–18 МВт.

В работе [6] исследуется влияние потока рециркуляции основного конденсата на экономичность работы ПТУ. Данный тепловой поток нагревается в ряде подогревателей низкого давления турбины и при отдельных режимах работы паровых турбин ПТ-80/100-130/13, Т-100/120-130-3, ПТ-135/165-130/15 сбрасывается в конденсатор. Необходимость работы с открытой рециркуляцией заключается в технологической необходимости минимального расхода основного конденсата через холодильники основных эжекторов турбины и эжектора уплотнений для их нормальной работы. Если расход пара на выходе из части низкого давления вышеперечисленных турбин меньше 70 т/ч, то из условий надежной работы, рециркуляция основного конденсата в этот период эксплуатации должна быть включена. Для снижения потерь теплоты с рециркуляцией основного конденсата и повышения тепловой экономичности паровых турбин автор предлагает перевести охлаждение основных эжекторов, эжекторов уплотнений и сальникового подогревателя с основного конденсата на химически обессоленную воду. Модернизация схемы рециркуляции основного конденсата на турбоагрегате ПТ-135/165-130/15 ОАО «Дзержинская ТЭЦ» (ст. № 6) позволила получить снижение тепловых потерь на 21000 ГДж (4826 Гкал) в год при длительности работы в указанном режиме – 3800 ч.

Предложенные В.Д. Великороссовым пути модернизации тепловой схемы энергоблоков 300 МВт Костромской гидрорециркуляционной электростанции позволяют повысить экономичность его работы [7]. Автором, помимо прочих изменений тепловой схемы, был определен тепловой поток дренажа рабочего пара подогревателя низкого давления (ПНД-1), который в действующей на тот момент схеме сливался в конденсатор турбины. Перенаправление дренажа ПНД-1 в смеситель ЦКТИ, расположенный между конденсатором и конденсатными насосами (КЭН) – на

всасе КЭН позволило снизить потери теплоты с горячим дренажом в конденсаторе. Суммарное изменение мощности составило 230 кВт.

Следует отметить, что в вышеперечисленных работах не использовались математические модели целой энергетической установки. Отсутствие замеров ряда режимных параметров регенерации низкого давления турбоагрегата затрудняет выполнение требуемых расчетов. Получение этих замеров может быть выполнено при проведении специальных испытаний установки с привлечением специализированных организаций, а это, в свою очередь, требует дополнительных финансовых затрат. Настроенная же в соответствии с методикой идентификации математическая модель энергетической установки позволяет выполнять необходимые расчеты с высокой точностью и находить с их помощью оптимальные решения. Более того, математическая модель установки предоставляет возможность оперативно оценить эффект от нескольких совместно выполненных модернизаций схемы. Следует также отметить, что отличием данной работы является модернизация, которая включает только перенаправление тепловых потоков без внесения в схему новых элементов энергетического оборудования.

Необходимо учитывать, что одним из принципов принятия тех или иных технических решений является комплексный анализ их эффективности. Оптимальными в сфере производства являются решения, способствующие наибольшему повышению его эффективности. Эта эффективность определяется по соотношению с затратами, необходимыми для ее достижения. В данной работе рассматривается возможность модернизации действующей схемы энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «Байкальская Энергетическая Компания» (ООО «БЭК»). В тепловой схеме энергоблока авторами был выявлен ряд дренажей, которые снижают экономичность его работы. Комплексный анализ эффективности предложенных изменений тепловой схемы был выполнен в три этапа.

Выявление технической целесообразности служит первым этапом комплексного

анализа. Вторым этапом анализа являются инженерно-экономические расчеты. Однако практика применения отраслевых методик технико-экономических расчетов показывает, что в них не находят отражения в должной мере особенности экономической оценки проектирования и реконструкции энергетических установок, отдельных мероприятий по технической эксплуатации и ремонту энергетических установок. Поэтому представляет научный интерес разработка дополнительных методов и рекомендаций, относящихся непосредственно к оценке экономической эффективности проектно-конструкторских, технологических и организационно-технических разработок в области эксплуатации технических средств, устройств и систем.

Учитывая это, в данной работе для оценки эффективности предложенных изменений используется подробная математическая модель, которая с достаточной точностью настроена на фактические режимы работы оборудования. Для идентификации параметров использовалась разработанная в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) трехэтапная методика идентификации параметров математических моделей энергетического оборудования [8–10]. В ходе многолетней эксплуатации тепловые характеристики вспомогательного оборудования, входящего в состав энергетических установок, изменяются, и возникают отличия от характеристик, определяемых заводом изготовителем. Поэтому при математическом моделировании существующих энергоустановок требуется их настройка с учетом текущего состояния оборудования по

результатам замеров контрольных параметров, выполненных в нескольких установившихся режимах работы. Данная методика позволяет настроить коэффициенты математической модели таким образом, чтобы результаты, получаемые с помощью математической модели, как можно более точно соответствовали фактическому состоянию оборудования, что обеспечивает обоснованность оптимизационных решений. Оптимизационные расчеты, необходимые для идентификации математической модели, производились модифицированным градиентным методом, разработанным в ИСЭМ СО РАН [11–13]. Данный метод решения систем нелинейных уравнений в отличие от работ зарубежных авторов [14–18] позволяет решать оптимизационные задачи больших размерностей (сотни оптимизируемых параметров, тысячи ограничений-равенств и ограничений-неравенств) с высокой точностью.

Завершающим этапом является комплексный сравнительный анализ действующей и модернизированной тепловой схемы энергоблока по обобщенным экономическим показателям с учетом критериев эксплуатационной надежности и формулировка выводов.

ВЫЯВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

В действующей тепловой схеме энергоблока № 5 были выделены три тепловых потока, которые снижают его экономичность. Дренаж эжектора уплотнений ЭУ-5 заведен в конденсатор турбины. Технические характеристики эжектора уплотнений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Техническая характеристика эжектора уплотнений ЭУ-5 [19]

Table 1. Technical characteristics of EU-5 sealing ejector [19]

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Расход отсасываемой смеси	кг/с	0,354
– в том числе пара	кг/с	0,117
– в том числе воздуха	кг/с	0,238
Расход рабочего пара	кг/с	0,1
Расход охлаждающего конденсата	кг/с	41,67
Давление охлаждающего конденсата	МПа	1,37
Температура охлаждающего конденсата	°С	48
Давление отсасываемой смеси на входе	МПа	0,09
Давление отсасываемой смеси на выходе	МПа	0,1



Расход дренажа ЭУ-5 составляет 0,217 кг/с. Он определяется как сумма расходов рабочего пара и паровой составляющей его паспортной производительности. В ходе проведения исследований был выполнен замер температуры стенки трубы, по которой протекает рассматриваемый тепловой поток. Температура составила 70°C. Замер выполнен на площадке обслуживания конденсатного насоса «5В» (КЭН-5В) в районе конденсатосборника паровой турбины.

Дренаж основных эжекторов ОЭ-5А, Б (ЭП-3-600) заведен в действующей схеме в паровое пространство конденсатора. Следует отметить, что расход дренажа при эксплуатации действующего оборудования отличается от паспортного¹. Паспортный расход рабочего пара 0,167 кг/с обеспечивается при рабочем давлении 0,59 МПа (6 кгс/см²).

На практике, ввиду наличия присосов воздуха в вакуумную систему – повышенной неплотности вакуумной системы, давление рабочего пара перед эжекторами необходимо поддерживать в пределах 0,98–1,08 МПа (10–11 кгс/см²), в работе постоянно находятся два основных эжектора. Следствие этого – пропорционально возрастающий расход рабочего пара. Расход дренажа ОЭ-5А, Б был определен как суммарный двойной паспортный расход рабочего пара и суммарная паспортная производительность по пару. Суммарный расход дренажа составляет 0,668 кг/с. Замер температуры стенки трубы был выполнен на дренажном трубопроводе основных эжекторов блока (отметка 9 м, трубопровод из 1 ступени основного эжектора), температура стенки составила 50°C.

Дренаж линии прогрева блочной редукционно-охладительной установки (БРОУ-2) котлоагрегата (КА) № 9 энергоблока № 5 заведен в нижнюю часть конденсатосборника и необходим для поддержания «тупикового» участка трубопровода горячего промперегрева перед закрытой БРОУ-2 в прогретом состоянии. В действующей схеме параметры пара на входе в исследуемый тепловой поток

принимаются равными параметрам пара горячего промперегрева КА-9. Линия прогрева, внутренним диаметром 10 мм врезается в трубопровод дренажа «калача» БРОУ-2 диаметром 32 мм. Переход на меньший диаметр выполнен для снижения расхода «прогревочного» дренажа и, как следствие, уменьшения потерь тепла в конденсаторе паровой турбины. Расход дренажа определяется из классической формулы скорости движения газа в газопроводе², используя значения давления и температуры рабочей среды, а также внутренний диаметр трубопровода. В результате расчета расход дренажа составляет 0,128 кг/с.

Формулировка проблемы. Физический смысл проблемы заключается в безвозвратной потере тепла потоков дренажей с охлаждающей водой и, как следствие, снижение экономичности работы оборудования. В действующей схеме горячие дренажи ЭУ-5 с температурой 70°C, ОЭ-5А, Б с температурой 50°C сбрасываются в конденсатосборник паровой турбины по принципу каскадной схемы, в которой дренаж удаляется самотеком из подогревателя с более высоким давлением в подогреватель с более низким давлением, а затем в конденсатор турбины. Как следствие – появляется потеря теплоты с «горячим» дренажом, отводимым в конденсатор, где эта теплота отдается охлаждающей воде.

Комбинированная схема отвода дренажа по тепловой экономичности эффективнее каскадной схемы. Она применяется в действующей тепловой схеме по отношению к конденсату греющего пара ПНД-1,2,3,4 регенерации низкого давления. Предлагается применить принцип комбинированной схемы для тепловых потоков дренажей ЭУ-5 и ОЭ-5А, Б и включить вышеперечисленные тепловые потоки в существующую комбинированную схему, для чего перенаправить их на всас дренажного насоса ПНД-1, отказавшись от их каскадного слива в конденсатор. Этот выбор основан на следующем принципе: «для обеспечения наибольшей тепловой

¹Производственная инструкция по эксплуатации паровой турбины К-160-130/КТЦ ТЭЦ-10.

²Справочник по проектированию магистральных трубопроводов / под. ред. А.К. Деркацкая. Л.: «Недра», Ленинградское отделение, 1977. 520 с.

экономичности смешивать конденсат из подогревателей и основной конденсат турбины следует при условиях, соответствующих наибольшему приближению к обратимому процессу смешения, т.е. при наименьшей разности температур. При выполнении этого условия не будет происходить увеличения конденсационной выработки и повысится термический КПД цикла вследствие снижения потерь в конденсаторе турбины [20].

На рисунке представлены действующая и измененная тепловые схемы энергоблока № 5. На представленной схеме жирной штриховой линией показаны направления тепловых потоков дренажей в действующей схеме, которые заведены в конденсатор турбины, а жирной сплошной линией – предложенные изменения.

Расчет математической модели показывает, что температура основного конденсата за ПНД-1 составляет $56,7^{\circ}\text{C}$; температура дренажей ЭУ-5, ОЭ-5А, Б и ПНД-1 после смешивания составляет $53,5^{\circ}\text{C}$. Из этого можно сделать вывод об эффективности выбранного пути направления рассматриваемых потоков дренажей, так как разница температур основного конденсата за ПНД-1 и дренажей после смешения минимальна и составляет $3,2^{\circ}\text{C}$.

Тепловой поток дренажной линии прогрева трубопровода «калacha» БРОУ-2 КА-9, в отличие от вышерассмотренных низкопотенциальных потоков, является потоком с высоким потенциалом аккумулированного в нем тепла, которое бесполезно теряется в конденсаторе. Его перенаправление в паровое пространство ПНД-1 приведет к уменьшению расхода рабочего пара в 8 отбор турбины, «питающий» ПНД-1. Это произойдет по причине вытеснения отбираемого пара дренажом с более высоким давлением. Как следствие, увеличится конденсационная выработка электроэнергии последнего отсека цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой турбины. В результате будет сохранено тепло данного дренажа в цикле блока и большее количество пара совершит полезную работу в последнем отсеке ЦНД.

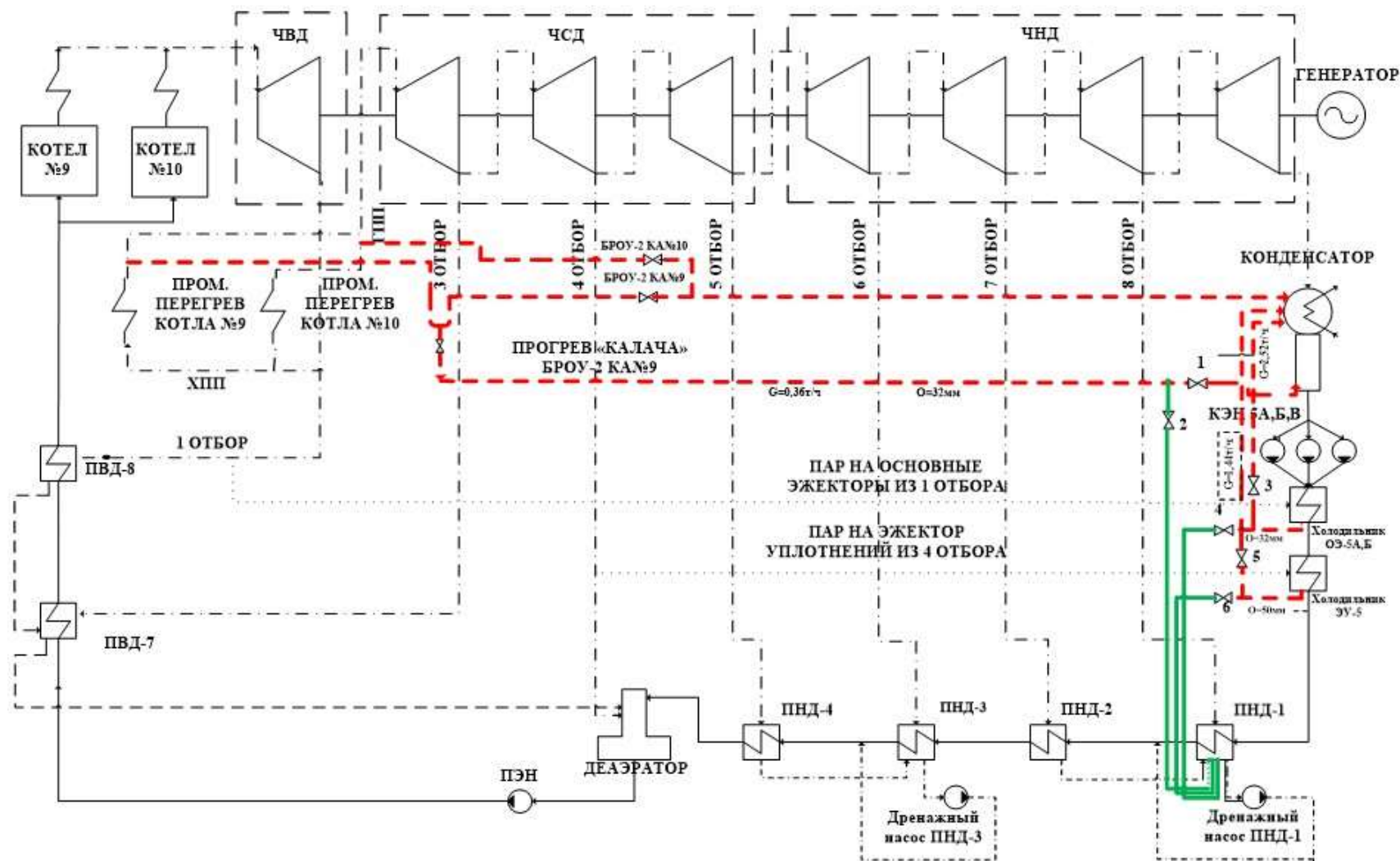
Следует также отметить, что предложенная модернизация тепловой схемы позволит

сохранить требуемую эксплуатационную надежность работы рассматриваемой энергетической установки без внесения дополнительных изменений в действующую схему. Производительность дренажного насоса ПНД-1 и пропускная способность трубопровода аварийного перелива дренажа ПНД-1 в конденсатор позволят исключить аварийное повышение уровня на всех режимах работы в случаях возникновения нештатных эксплуатационных ситуаций с учетом дополнительного расхода дренажа исследуемых потоков.

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАСТРОЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА

Дать корректную оценку вышеописанного изменения направления тепловых потоков весьма затруднительно без применения методов современного математического моделирования процессов, протекающих в ПТУ. Все исследования и расчеты, представленные в данной работе, были выполнены на математической модели конденсационного дубль блока № 5, входящего в состав основного оборудования ТЭЦ-10 ООО «БЭК». Подробная математическая модель энергоблока была построена с помощью разработанного в ИСЭМ СО РАН программно-вычислительного комплекса «Система машинного построения программ» [21, 22].

Модель энергоблока состоит из составных моделей двух котлоагрегатов и турбоустановки, соединенных между собой связями по пару и воде. Расчетная схема энергоблока включает 121 элемент и 198 связей между ними. Полученная математическая модель содержит 1297 информационно-входных, 1457 информационно-выходных параметров, из которых 132 являются итерационно-вычисляемыми и требуют задания начального приближения. Расчетная схема математической модели котлоагрегата ПК-24 состоит из 27 элементов и 45 связей между ними. Она моделирует протекающие в нем тепловые, гидравлические и аэродинамические процессы. Уравнения элементов составлены из нормативных методов уравнений расчета котлоагрегата.



Примечание: ХПП – холодная нитка пара промежуточного перегрева; ПЭН – питательный электронасос; ГПП – холодная нитка пара промежуточного перегрева; ЧВД – часть высокого давления; ЧСД – часть среднего давления; ЧНД – часть низкого давления.

Модернизация тепловой схемы регенерации низкого давления энергоблока № 5
Modernization of the heat balance diagram of low pressure regeneration of no.5 power unit

Для определения настраиваемых коэффициентов математической модели исследуемого энергоблока использовалась трехэтапная методика идентификации параметров математических моделей теплоэнергетических установок, разработанная в ИСЭМ СО РАН [8–10]. Данная методика предполагает исключение на первом этапе идентификации «плохих» замеров контрольных параметров, погрешности которых выходят далеко за рамки класса точности используемых средств измерений. Далее на втором этапе идентификации оптимизирована максимальная относительная невязка между замеряемыми на установке параметрами и параметрами, полученными при расчете математической модели энергоблока. Оптимальное значение максимальной относительной невязки замеряемых параметров составило 2,90. Это значение удовлетворяет условию точности по «правилу 3σ » [23, 24]. Так как достоверная вероятность в этом случае равняется 0,997, все случайные погрешности замеряемых параметров можно объяснить несовершенством используемых измерительных приборов. На третьем этапе идентификации была оптимизирована сумма квадратов всех относительных невязок замеряемых параметров для достижения наилучшей точности сходимости разработанной математической модели с текущими режимами работы действующей установки.

Замеры параметров работы энергоблока № 5, необходимые для выполнения идентификации его математической модели, были выполнены в ходе эксплуатации оборудования осенью 2018 г. В течение рабочей смены продолжительностью 12 ч были взяты замеры параметров для установившихся режимов работы с электрической нагрузкой 140, 132 и 108 МВт. В промежутках времени между замерами параметров не проводились работы, которые могут повлиять на состояние оборудования: сушка трубных досок конденсатора турбины, обдувка поверхностей нагрева котлоагрегатов и др. Неизменными во время проведения замеров оставались температура охлаждающей воды на входе в конденсатор паровой турбины и атмосферное давление воздуха.

На практике предлагается сохранить действующую тепловую схему и параллельно реализовать предложенные перенаправления тепловых потоков дренажей подогревателей регенерации низкого давления. Сохранение действующей тепловой схемы необходимо на случай отключения первой группы ПНД на работающей турбине, а также вывода в ремонт или аварийного отключения дренажного насоса ПНД-1. На схеме добавлена новая арматура: вентиль 1 – дренаж «калачей» БРОУ-2 в конденсатор турбины; вентиль 2 – дренаж «калачей» БРОУ-2 в ПНД-1; вентиль 3 – дренаж ОЭ-5А, Б в конденсатор турбины; вентиль 4 – дренаж ОЭ-5А, Б в ПНД-1; вентиль 5 – дренаж ЭУ-5 в конденсатор турбины; вентиль 6 – дренаж ЭУ-5 в ПНД-1. Целесообразно для удобства эксплуатации разместить вентили «1» и «2» в непосредственной близости с конденсатосборником.

Тепловой поток дренажа основных эжекторов блока предлагается завести на всас дренажного насоса ПНД-1 – врезать в трубопровод между ПНД-1 и насосом. Вариантные расчеты математической модели показывают, что температура дренажа основных эжекторов на всех режимах работы не превышает температуры насыщения в ПНД-1, следовательно, исключено его вскипание. Тепловой поток дренажа эжектора уплотнений предлагается завести в паровое пространство ПНД-1 под уровень конденсата греющего пара. Первоначально предложенное более простое, с точки зрения монтажа, решение по выбору направления на всас дренажного насоса ПНД-1 может привести к его нестабильной работе [25]. Из расчетов математической модели видно, что температура дренажа ЭУ-5 превышает температуру насыщения в ПНД-1 на отдельных режимах работы турбины, следовательно, возможно вскипание дренажа на всасе насоса, что является недопустимым, так как может привести к «запариванию» насоса. По той же причине тепловой поток прогрева «калача» БРОУ-2 КА-9 предлагается завести в паровое пространство ПНД-1 под уровень конденсата греющего пара.

В табл. 2 представлены результаты рас-



четов математической модели энергоблока № 5 для действующей и измененной тепловой схемы для режима работы с электрической нагрузкой 140 МВт на клеммах генератора.

Результаты вариантных расчетов математической модели показывают, что перенаправление тепловых потоков дренажей основных эжекторов и эжектора уплотнений энергоблока № 5 позволит уменьшить удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии на 0,017 г.

Перенаправление теплового потока линии прогрева БРОУ-2 КА-9 позволит уменьшить удельный расход условного топлива на вы-

работку 1 кВт·ч на 0,043 г. Совместное же перенаправление выше перечисленных тепловых потоков из конденсатора паровой турбины в ПНД-1 приведет к снижению удельного расхода условного топлива на выработку 1 кВт·ч на 0,052 г.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ

В табл. 3 представлены капиталовложения, необходимые на приобретение труб соответствующих диаметров³ и запорной арматуры⁴, а также стоимость их монтажных работ^{5,6}. Из табл. 3 видно, что для реализации

Таблица 2. Результаты расчетов действующей и измененной тепловой схемы энергоблока
Table 2. Calculation results of the current and modified heat balance diagram of the power unit

Параметры, единицы измерения	Действующая тепловая схема	Тепловые потоки дренажей ОЭ-5А,Б; ЭУ-5 заведены в ПНД-1	Тепловой поток линии прогрева БРОУ-2 заведен в ПНД-1	Совместное перенаправление исследуемых тепловых потоков в ПНД-1
Электрическая мощность на клеммах генератора, МВт	136,225	136,231	136,240	136,244
Давление пара в конденсаторе, кПа	5,3836	5,3835	5,3828	5,3827
Температура отработавшего пара на выходе из ЦНД, °С	34,2184	34,2179	34,2157	34,2155
Расход пара в конденсатор, кг/с	91,29	91,33	91,43	91,47
Расход пара на ПНД-1, кг/с	2,332	2,306	2,296	2,268
Электрическая мощность отсека CND4, МВт	12,613	12,625	12,652	12,662
Температура основного конденсата на входе в ПНД-1, °С	41,641	41,717	41,637	41,711
Температура основного конденсата на выходе из ПНД-1, °С	56,695	56,759	56,693	56,746
Температура дренажа на выходе из дренажного насоса ПНД-1, °С	52,714	53,547	52,661	53,534
Расход дренажа на выходе из дренажного насоса ПНД-1, кг/с	5,303	6,266	5,269	6,232
КПД нетто энергоблока, %	33,386	33,389	33,392	33,393
Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии (нетто), г.у.т/кВт·ч	367,975	367,958	367,932	367,923

³ «МеталлЭнергоХолдинг» Иркутск // Группа компаний «МеталлЭнергоХолдинг» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metalloprokat-38.ru> (15.12.2020).

⁴ Компенсационное оборудование и трубопроводная арматура в Новосибирске [Электронный ресурс]. URL: <https://www.apk-nsk.ru> (15.12.2020).

⁵ Гондарь А.В., Трофимов Ю.В., Шар Б.И., Осипов О.Б. Базовые цены на работы по ремонту энергетического оборудования, адекватные условиям функционирования конкурентного рынка услуг по ремонту и техперевооружению. М., 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293831/4293831699.htm> (15.12.2020).

⁶ Трофимов Ю.В., Шар Б.И. РД 153-34.1-20.607-2002. Методические указания по формированию смет и калькуляций на ремонт энергооборудования. М., 2002. [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data1/39/39532/index.htm> (15.12.2020).

предложенной модернизации на практике необходимо затратить 26883 руб. на приобретение арматуры и труб соответствующих диаметров и 7308 руб. на монтажные работы. Общие затраты на осуществление проекта составят 34191 руб. В производственно-техническом отделе ТЭЦ-10 были получены технико-экономические показатели работы энергоблока № 5 за 2019 г. Эти данные представлены в табл. 4. Зная продолжительность работы энергетического оборудования, можно определить годовой коэффициент его экстенсивного использования (β_3). Данный коэффициент характеризует использование оборудования по времени нахождения в работе и определяется по следующей формуле:

$$\beta_3 = \frac{T_{\phi}}{T_{\kappa}} = \frac{4679}{8760} = 0,534,$$

где T_{ϕ} – фактическое время работы; T_{κ} – календарное время, количество часов в году.

Следует отметить, что β_3 за 2019 г. можно рассматривать как усредненный показатель использования рассматриваемой энергетической установки за последнее десятилетие. Это связано с тем, что в начале прошлого десятилетия коэффициент β_3 был равен 0,35–0,40, а с 2014 г. увеличивался до значения 0,65–0,85 по причине снижения гидроэнергетического потенциала оз. Байкал и, как следствие, перераспределения выработки электрической энергии с гидрогенерации на угольную генерацию.

Показатели экономической эффективности предложенной модернизации тепловой схемы приведены в табл. 5. Из таблицы можем наблюдать, что при работе оборудования в течение года с $\beta_3 = 0,534$ срок окупаемости предложенной модернизации тепловой схемы составит 5,5 мес. Экономия средств за первый год эксплуатации с учетом окупаемости капиталовложений и затрат на амортизацию составит 18423 руб.

Таблица 3. Капиталовложения для модернизации тепловой схемы энергоблока

Table 3. Capital investments for power unit heat balance diagram modernization

Наименование	Требуемое количество	Стоимость, руб.
Труба d, 32 мм (ВГП* 32*3)	40 м	1705
Труба d, 50 мм (ВГП 50*3,5)	15 м	2778
Вентиль 15с22нж d,32 Р,40	4 шт	12400
Вентиль 15с22нж d,50 Р,40	2 шт	10000
Монтажные работы	–	7308
ИТОГО:	–	34191

* Водогазопроводная труба.

Таблица 4. Техничко-экономические показатели работы энергоблока № 5 за 2019 г.

Table 4. Technical and economic indicators of no. 5 power unit operation for 2019

Показатель	Единица измерения	Значение
Продолжительность работы	ч	4679
Выработка электроэнергии	кВт·ч	499441394
Удельный расход условного топлива	г.у.т/кВт·ч	391,3
Цена условного топлива	руб/т.у.т	2137,76

Таблица 5. Показатели энергетической эффективности модернизации тепловой схемы энергоблока

Table 5. Energy efficiency indicators of power unit heat balance diagram modernization

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Значение
Снижение удельного расхода топлива	Δb	г.у.т/кВт·ч	0,052
Экономия топлива за год	ΔB	т.у.т	25,971
Дополнительные капиталовложения	ΔK	руб.	34191
Дополнительные затраты на амортизацию	ΔI_a	руб.	2906
Экономический эффект	E_n	%	153,9
Срок окупаемости	T_o	год	0,461



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В действующей тепловой схеме энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «БЭК» был выявлен ряд тепловых потоков, которые снижают экономичность его работы. Выявление потерь тепла в действующей схеме, а также определение путей модернизации с целью их снижения были выполнены с применением методики анализа эффективности принятия технических решений и методов математического моделирования.

Оценка эффективности принятых технических решений выполнена с помощью вариантов расчетов, произведенных на разработанной и настроенной на текущее состояние математической модели энергоблока. С применением настроенной математической модели были рассчитаны необходимые неизменяемые режимные параметры тепловой схемы энергетической установки и показате-

ли экономической эффективности. Данный подход можно применить для других энергетических установок с целью поиска путей повышения эффективности их работы.

Представленные авторами предложения позволяют повысить эффективность работы исследуемого оборудования при сохранении эксплуатационной надежности без значительных капиталовложений в условиях реальной эксплуатации. Предложенный комплекс технических решений был согласован с ключевыми руководителями подразделений филиала ТЭЦ-10 ООО «БЭК», а также было получено заключение о возможности его внедрения. Предложенные мероприятия приведут к снижению расхода топлива при той же выработке электроэнергии, что повысит энергетическую эффективность энергоблока.

Список литературы

1. Ведрученко В.Р., Жданов Н.В., Кульков М.В. Выбор критерия оценки эффективности разработки и реконструкции тепловой схемы энергетической установки // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2008. Вып. 7. С. 60–64 с.
2. Клер А.М., Тюрина Э.А. Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2016. 298 с.
3. Гуторов В.Ф., Симою Л.Л., Эфрос Е.И. Пути повышения экономичности паротурбинных установок ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2001. № 6. С. 32–37.
4. Лупов Н.С. Принцип работы эжектора // Омский научный вестник. 2015. № 2. С. 167–168.
5. Лазарев Л.Я., Соколов В.С., Фадеев В.А., Чижов В.В. Варианты модернизации ЦНД турбин большой мощности // Электрические сети [Электронный ресурс]. URL: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/varianty-modernizacii-cnd-turbin-bolshoy-moschnosti.html> (12.12.2020).
6. Меркулов В.А., Марченко Е.М. Влияние работы конденсационных устройств на эффективность турбоустановок в зависимости от загрузки электростанции // Радиоэлектроника, электротехника, энергетика: тез. докл. IX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва, 4–5 марта 2003 г.): в 3 т. Т. 3. М.: Изд. дом «МЭИ», 2003. С. 148–149.
7. Мошкарин А.В., Копсов А.Я., Великороссов В.В., Таран О.Е., Платов А.И. Тепловая эффективность замены поверхностного ПНД2 на смешивающий // Труды Ивановского государственного энергетического университета. Вып. 3. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 1999. С. 30–32.
8. Алексеюк В.Э., Максимов А.С., Сафронов П.Г. Усовершенствованная методика идентификации матема-

- тических моделей теплоэнергетического оборудования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 3. С. 503–515. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-503-515>
9. Alekseiuk V. Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment // ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002>
10. Alexeyuk V.E. An improved technique for identification of mathematical models of thermal power equipment // Energy Systems Research. 2018. Vol. 1. No. 3. P. 53–60. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0007>
11. Клер А.М. Эффективные методы схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок: разработка и применение: монография. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2018. 145 с.
12. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods // Energy. 2019. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>
13. Kler A.M., Potanina Yu.M., Marinchenko A.Y. Co-optimization of thermal power plant flowchart, thermodynamic cycle parameters, and design parameters of components // Energy. 2020. Vol. 193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116679>
14. Baghsheikhi M., Sayyaadi H. Real-time exergoeconomic optimization of a steam power plant using a soft computing-fuzzy inference system // Energy. 2016. Vol. 114. P. 868–884. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.044>
15. Wang Ligang, Yang Yongping, Dong Changqing, Morosuk T., Tsatsaronis G. Parametric optimization

of supercritical coal-fired power plants by MINLP and differential evolution // *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 85. P. 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.006>

16. Wang Chaojun, He Boshu, Yan Linbo, Pei Xiaohui, Shinan Chen. Thermodynamic analysis of a low-pressure economizer based waste heat recovery system for a coal-fired power plant // *Energy*. 2014. Vol. 65. P. 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.084>

17. Boyaghchi F.A., Molaie H. Sensitivity analysis of exergy destruction in a real combined cycle power plant based on advanced exergy method // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 99. P. 374–386. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.048>

18. Suresh M.V.J.J., Reddy K.S., Ajit Kumar Kolar. ANN-GA based optimization of a high ash coal-fired supercritical power plant // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. Iss. 12. P. 4867–4873. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.029>

19. Соболев С.П. Паровая турбина К-160-130 ХТГЗ. М.: Изд-во «Энергия», 1980. 192 с.

20. Аронсон К.Э., Блинков С.Н., Брезгин В.И., Бродов Ю.М., Купцов В.К., Ларионов И.Д. [и др.]. Теплообменники энергетических установок. Екатеринбург; УрФУ,

2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://openedu.urfu.ru/files/book/> (12.12.2020).

21. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А., Корнеева З.Р. Теплосиловые системы: Оптимизационные исследования. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2005. 236 с.

22. Клер А.М., Деканова Н.П., Скрипкин С.К. и др. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями. Новосибирск: Наука, сиб. предприятие РАН, 1997. 120 с.

23. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд., испр. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1991. 303 с.

24. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников: монография. 2-е изд., испр. М.: Изд-во «Физматлит», 2012. 816 с.

25. Забуга Ф.В. Использование математической модели энергоблока для модернизации его технологической схемы // Системные исследования в энергетике: тр. молодых ученых Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Вып. 48. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2016. С. 51–56.

References

1. Vedruchenko VR, Zhdanov NV, Kulkov MV. Choice of criterion of the estimation of efficiency of development and reconstruction of the thermal schema of power setting. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii = The Russian Automobile and Highway Industry Journal Vestnik SibADI*. 2008;7:60–64 p. (In Russ.)

2. Kler AM, Tyurina EA. Optimization studies of power plants and complexes. Novosibirsk: Geo; 2016, 298 p. (In Russ.)

3. Gutorov VF, Simoyu LL, Efros EI. Methods for enhancing the economic efficiency of steam-turbine installations of cogeneration stations. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2001;6:32–37. (In Russ.)

4. Lupov NS. Operating principle of ejector. *Omskij nauchnyj vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2015;2:167–168. (In Russ.)

5. Lazarev LYa, Sokolov VS, Fadeev VA, Chizhov VV. Upgrading options of high-power turbine low pressure cylinders. *Elektricheskie seti*. Available from: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/varianty-modernizacii-cnd-turbin-bolshoy-moschnosti.html> [Accessed 12th December 2020]. (In Russ.)

6. Merkulov VA, Marchenko EM. Effect of condensing device operation on turbine plant efficiency depending on power plant load. In: *Radioelektronika, elektrotehnika, energetika: tezisy dokladov IX Mezhdunarodnoj nauchnotekhnicheskoy konferencii studentov i aspirantov = Radio electronics, electrical engineering, power engineering: abstracts of IX International scientific and technical conference of students and postgraduates*: in 3 vol. Vol. 3. 4–5 March 2003, Moscow. Moscow: MEI; 2003, p. 148–149. (In Russ.)

7. Moshkarin AV, Kopsov AYa, Velikorossov VV, Taran OE, Platov AI. Thermal efficiency of surface HD polyethylene 2 replacement with a mixing one. In: *Trudy*

Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Iss. 3. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University; 1999, p. 30–32. (In Russ.)

8. Alekseyuk VE, Maksimov AS, Safronov PG. Improved identification methods for thermal power equipment mathematical models. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):503–515. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-503-515>

9. Alekseyuk V. Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment. In: *ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: E3S Web of Conferences*. 2020;209. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903002>

10. Alexeyuk VE. An improved technique for identification of mathematical models of thermal power equipment. *Energy Systems Research*. 2018;1(3):53–60. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0007>

11. Kler AM. Effective methods of circuit-parametric optimization of complex thermal power plants: development and application. Novosibirsk: Geo; 2018, 145 p. (In Russ.)

12. Kler AM, Zharkov PV, Epishkin NO. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. *Energy*. 2019;189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>

13. Kler AM, Potanina YuM, Marinchenko AY. Co-optimization of thermal power plant flowchart, thermodynamic cycle parameters, and design parameters of components. *Energy*. 2020;193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116679>

14. Baghsheikhi M, Sayyaadi H. Real-time exergoeconomic optimization of a steam power plant using a soft computing-fuzzy inference system. *Energy*. 2016;114:868–884.



<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.044>

15. Wang Ligang, Yang Yongping, Dong Changqing, Morosuk T, Tsatsaronis G. Parametric optimization of supercritical coal-fired power plants by MINLP and differential evolution. *Energy Conversion and Management*. 2014;85:828–838.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.006>

16. Wang Chaojun, He Boshu, Yan Linbo, Pei Xiaohui, Shinan Chen. Thermodynamic analysis of a low-pressure economizer based waste heat recovery system for a coal-fired power plant. *Energy*. 2014;65:80–90. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.084>

17. Boyaghchi FA, Molaie H. Sensitivity analysis of exergy destruction in a real combined cycle power plant based on advanced exergy method. *Energy Conversion and Management*. 2015;99:374–386. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.048>

18. Suresh MVJJ, Reddy KS, Ajit Kumar Kolar. ANN-GA based optimization of a high ash coal-fired supercritical power plant. *Applied Energy*. 2011;88(12):4867–4873. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.029>

19. Sobolev SP. K-160-130 HTGZ Steam turbine. Moscow: Energiya; 1980, 192 p. (In Russ.)

20. Aronson KE, Blinkov SN, Brezgin VI, Brodov YuM, Kupcov VK, Larionov ID, et al. Power plant heat exchang-

ers. Ekaterinburg: Ural Federal University; 2015. Available from: <https://openedu.urfu.ru/files/book/> [Accessed 12th December 2020]. (In Russ.)

21. Kler AM, Dekanova NP, Tyurina EA, Korneeva ZR. *Thermal power systems: optimization studies*. Novosibirsk: Nauka; 2005, 236 p. (In Russ.)

22. Kler AM, Dekanova NP, Skripkin SK. Et al. *Mathematical modeling and optimization in the problems of thermal power plant operational control*. Novosibirsk: Nauka, Siberian enterprise RAS; 1997, 120 p. (In Russ.)

23. Novickij PV, Zograf IA. *Estimation of measurement result errors*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otделение; 1991, 303 p. (In Russ.)

24. Kobzar' AI. *Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: Fizmatlit; 2012, 816 p. (In Russ.)

25. Zabuga FV. Using power unit mathematical model for its technological scheme modernization. In: *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodyh uchenykh Instituta sistem energetiki im. L.A. Melent'eva SO RAN = System research in power engineering: works of young scientists of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS*. Iss. 48. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of sciences; 2016, p. 51–56. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Забуга Федор Викторович,

аспирант,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
старший машинист энергоблоков котлотурбинного
цеха ТЭЦ-10,
ООО «Байкальская Энергетическая Компания»,
✉ e-mail: xpbellow@rambler.ru

Алексеев Виталий Эдуардович,

младший научный сотрудник,
Отдел теплосиловых систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: alexeyuk.vitaliy@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 02.02.2021; одобрена после рецензирования 11.03.2021; принята к публикации 29.04.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedor V. Zabuga,

Postgraduate Student,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
Senior operator of power units of the Boiler
and Turbine Shop at CHP-10,
Baikal Energy Company LLC,
✉ e-mail: xpbellow@rambler.ru

Vitaliy E. Alekseyuk,

Junior Researcher,
Department of Heat Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: alexeyuk.vitaliy@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 02.02.2021; approved after reviewing 11.03.2021; accepted for publication 29.04.2021.



Оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц в сепараторе с соосно расположенными трубами

© В.Э. Зинуров*, А.В. Дмитриев*, Г.Р. Бадретдинова*, Р.Я. Биккулов*, И.Н. Мадышев**

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

Резюме: Цель – оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами и эффективности устройства. Для этого было произведено численное моделирование движения газового потока с мелкодисперсными частицами диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе исследований изменялись входная скорость газового потока от 5 до 10 м/с, ширина прямоугольной щели от 2,1 до 8,7 и ее высота от 10 до 30 мм. Показано, что максимальная эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и минимальные энергетические затраты на прокачку газового потока в устройстве существенным образом зависят от образования устойчивой вихревой структуры в межтрубном пространстве. Результаты исследований показали, что оптимальная входная скорость газового потока составляет 7,5 м/с. При данной скорости эффективность улавливания частиц соответствует более высоким скоростям с отклонением $\pm 6\%$. При этом потери давления составляют в 1,74 раза меньше, чем при более высоких скоростях. Для достижения эффективности не менее 90% и высоте прямоугольной щели от 10 до 30 мм числа Стокса должны соответствовать значениям равным более 50. Рассчитано, что энергетические затраты на прокачку газовой среды с частицами диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами составляют от 1,9 до 31,2 Вт при входной скорости газового потока 7,5 м/с. Параметры прямоугольной щели при этом могут быть: ширина – от 2,1 до 8,7 мм, высота – от 10 до 30 мм. Применение сепараторов с соосно расположенными трубами в технологической линии, в которой используются плазменные технологии, может стать альтернативой аппаратам тонкой очистки газов.

Ключевые слова: энергетические затраты, сепаратор, мелкодисперсные частицы, улавливание частиц, циклон, рукавный фильтр

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2710.2021.4.

Для цитирования: Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Биккулов Р.Я., Мадышев И.Н. Оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц в сепараторе с соосно расположенными трубами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 196–206. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-196-206>

Estimation of power consumption when trapping finely-dispersed particles in a separator with coaxially-arranged pipes

Vadim E. Zinurov*, Andrey V. Dmitriev*, Guzel R. Badretdinova*,
Rustem Ya. Bikkulov*, Ilnur N. Madyshev**

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract: This article sets out to estimate power consumption when trapping finely-dispersed particles of silicon dioxide using a separator with coaxially-arranged pipes, as well as the efficiency of such an installation. To this end, a numerical simulation of the movement of a gas flow with finely-dispersed particles of silicon dioxide through a separator with coaxial pipes was carried out in the ANSYS Fluent software. During the experiments, the inlet gas flow rate varied from 5 to 10 m/s, while the width and height of the rectangular slit ranged 2.1–8.7 and 10–30 mm, respectively. It was shown that the maximum efficiency of collecting finely-dispersed silicon dioxide particles and the minimum power consumption required for pumping the gas flow through the installation largely depends on the formation of a stable vortex structure in the inter-pipe space. The research showed that the optimal inlet gas flow rate equals 7.5 m/s. At this rate, the efficiency of particle

collection corresponds to higher rates with a deviation of $\pm 6\%$. In this case, the pressure loss is 1.74 times lower than that at higher rates. In order to achieve an efficiency of at least 90% with the height of the rectangular slit from 10 to 30 mm, the Stokes numbers must correspond to values of more than 50. The power consumption required for pumping a gas containing silicon dioxide particles through a separator equipped with coaxial pipes comprises from 1.9 to 31.2 W at the inlet gas flow rate of 7.5 m/s. In this case, the parameters of the rectangular slit are as follows: width – from 2.1 to 8.7 mm, height – from 10 to 30 mm. The use of separators with coaxially-arranged pipes in technological lines based on plasma technologies can become an alternative to installations for fine gas purification.

Keywords: energy costs, separator, fine particles, particle collection, cyclone, bag filter

Acknowledgements: The work is performed at the financial support of the grant of the President of the Russian Federation no. MK-2710.2021.4.

For citation: Zinurov VE, Dmitriev AV, Badretdinova GR, Bikkulov RYa, Madyshev IN. Estimation of power consumption when trapping finely-dispersed particles in a separator with coaxially-arranged pipes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):196–206. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-196-206>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач производственных предприятий, относящихся к энергетической, химической, металлургической и другим отраслям, является повышение энергоэффективности, энергосбережения технологических линий. Данная задача получила высокую степень актуальности для относительно нового направления – применения плазменных технологий для производственных целей. В частности, плазматроны, применяемые для обработки кремнеземистого материала для получения аэросила (диоксида кремния) – полупрозрачного порошка, получившего широкое распространение при производстве пластмассы, искусственной кожи, резины и других материалов, используются в технологических линиях, которые работают под создаваемым вентилятором вакуумом [1–4]. Относительно высокое гидравлическое сопротивление технологической линии приводит к работе вентилятора на максимальных мощностях, что является причиной периодических поломок и остановок всей линии, несущих материальный и производственный ущерб предприятию в целом. Ключевыми компонентами такой технологической линии являются плазматрон, загрузочная и реакционная камеры, система улавливания получаемого материала: циклон и рукавный фильтр, вентилятор. Основной вклад в гидравлическое сопротивление всей линии, приводящее к ее высоким энергетическим затратам, вносит система улавливания. Таким образом, для повышения энергоэффективности

и энергосбережения технологической линии при получении диоксида кремния необходима модернизация системы улавливания получаемого материала.

Применение двухступенчатой системы (циклон и рукавный фильтр) для улавливания диоксида кремния в технологической линии обусловлено особенностью плазменных методов: размер получаемых частиц существенно колеблется от 5 нм до 5 мкм. Также в результате коагуляции образуются частицы размером более 5 мкм. Вследствие этого для улавливания относительно крупных частиц размером более 20 мкм в технологической линии применяются циклоны, принцип действия которых основан на возникновении центробежных сил при вращательно-поступательном движении газа с частицами, которые отбрасываются к стенкам циклона и далее падают в бункер [5–9]. Для того чтобы улавливать частицы размером менее 20 мкм, применяются рукавные фильтры, принцип действия которых основан на задержке частиц на фильтровальных материалах, обволакивающих рукава аппарата, при движении газа с частицами через них. Пористость фильтровальных материалов подбирается индивидуально в зависимости от характеристик частиц в газовом потоке. Следует отметить, что использование циклона перед рукавным фильтром позволяет предотвратить преждевременный износ фильтровальных материалов за счет улавливания относительно крупных частиц размером более 20 мкм [10–14]. Ключевыми недостатками



двухступенчатой системы улавливания частиц диоксида кремния из газового потока является высокое гидравлическое сопротивление, приводящее к высоким энергетическим затратам линии, и необходимость в периодической очистке рукавов и замена фильтровальных материалов. Применение других наиболее распространенных аппаратов для улавливания мелкодисперсных частиц, в частности электростатических фильтров и аппаратов мокрой очистки, невозможно из-за температуры газового потока более 100°C [15–17]. Вследствие этого необходима разработка новых устройств для улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния, обладающих относительно небольшим гидравлическим сопротивлением. Целью данной работы является оценка энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами и эффективности устройства.

ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Авторами работы для улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния был разработан сепаратор [7] с соосно расположенными трубами (рис. 1). Устройство обладает простой конструкцией, которая изготавливается из 2 цилиндрических труб и пластины, привариваемой к трубам в межтрубном пространстве. Для движения газового потока в устройстве в нижней части внутренней цилиндрической трубы осесимметрично вырезаются прямоугольные щели и в пластине, располагающейся в межтрубном пространстве, вырезаются круглые отверстия. При этом количество круглых отверстий вдвое больше прямоугольных щелей [1–3].

Улавливание мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами осуществляется преимущественно за счет формирования устойчивой завихренной структуры газового потока с частицами в межтрубном пространстве, при которой возникают центробежные силы высоких значений, вследствие чего мелкодисперсные частицы при сильном вращении газа вылетают из структуры его движения в направлении к поверхности внутрен-

ней цилиндрической стенки внешней трубы, при контакте с которой мелкодисперсные частицы прилипают к ней за счет межмолекулярных и электростатических сил.

Сепарацию мелкодисперсных частиц диоксида кремния из газового потока в более общем виде можно описать следующим образом: газ с частицами подается в сепаратор с соосно расположенными трубами через входное отверстие 1, после чего он продвигается в нижнюю часть внутренней цилиндрической трубы 4 по мере достижения плоскости, на которой начинают появляться прямоугольные щели 5, структура движения газа изменяется – она начинает равномерно распределяться в осесимметричном направлении к прямоугольным щелям 5 [10–12]. Таким образом, направление движения газа изменяется на 90° . При данном повороте относительно крупные и средние частицы диоксида кремния, которые коагулировали между собой из мелких частиц в технологической линии после плазматрона, выбиваются из структуры потока и сыпаются в бункер устройства [4]. Остальная часть частиц диоксида кремния с газом проходит через прямоугольные щели 5, и каждая струя газа при выходе из прямоугольной щели в равном соотношении распределяется в две противоположные стороны друг от друга. При разделении струи газа на 2 потока каждая его часть движется под определенным углом в направлении к внутренней стенке внешней цилиндрической трубы, которая позволяет зеркально развернуть поток и придать ему вихревое движение. Далее завихренный газовый поток с частицами движется в верхнюю часть устройства в межтрубном пространстве к пластине с круглыми выходными отверстиями 2. Каждое круглое отверстие позволяет поддерживать вихревую структуру по высоте. При вращении газа в межтрубном пространстве возникают центробежные силы высоких значений, влияющие на сепарацию мелкодисперсных частиц диоксида кремния из газового потока, преимущественно за счет двух факторов [13]: первый – маленький радиус вихря, позволяющий увеличить значения центробежных сил, и второй – ускорение каждого вихря за счет сонаправленного дви-

жения соседних вихрей в точках контакта, что является особенностью данного устройства – прямоугольные щели проделаны таким образом, чтобы при выходе из них формировались 2 завихрения, при этом каждое завихрение при своем вращении контактирует с соседними завихрениями, в точке контакта вектора скорости сонаправлены, в результате за счет сил инерции в данных точках завихрения придают друг другу дополнительный импульс к движению. Вследствие этого количество круглых отверстий в пластине, которые равны количеству завихрений в устройстве, в 2 раза больше, чем прямоугольных щелей. При выбивании мелкодисперсных частиц диоксида кремния из газового потока в межтрубном пространстве они прилипают к поверхностям стенок сепаратора [7, 8]. Далее газовый поток выходит из устройства через выходные отверстия 2, проделанные в пластине (рис. 1). Следует отметить, что на рис. 1 представлена упрощенная трехмерная модель сепаратора с соосно расположенными трубами, на которой отсутствует изображение бункера в нижней части.

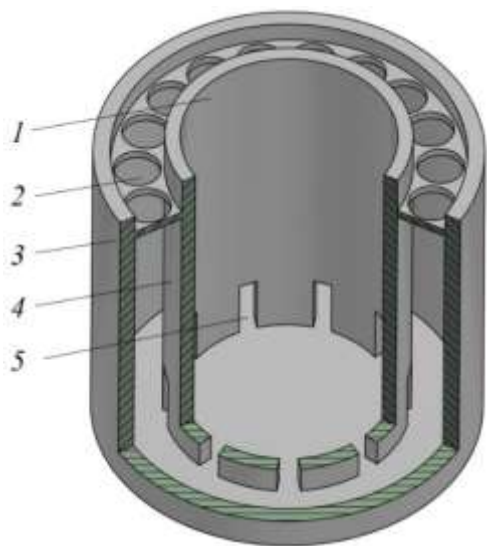


Рис. 1. Упрощенная трехмерная модель с разрезом сепаратора с соосно расположенными трубами: 1 – входное отверстие; 2 – выходные отверстия; 3 – внешняя цилиндрическая труба; 4 – внутренняя цилиндрическая труба; 5 – прямоугольные щели

Fig. 1. Simplified three-dimensional model with the section of the separator with coaxially arranged pipes: 1 – inlet; 2 – outlet; 3 – external cylindrical pipe; 4 – internal cylindrical pipe; 5 – rectangular gaps

Для оценки энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами было произведено численное моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent. Расчет производился на основе метода конечных элементов. Моделирование течения жидкостей и газов осуществляется путем решения уравнения Навье – Стокса [18–20]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (1)$$

где ∇ – оператор набла; Δ – векторный оператор Лапласа; t – время, с; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; p – давление, Па; $\vec{v}$ – векторное поле скорости; $\vec{f}$ – векторное поле массовых сил.

Уравнение Навье – Стокса дополняется уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (2)$$

Процесс получения выборки данных численного моделирования для оценки энергетических затрат при улавливании мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами в программном комплексе ANSYS Fluent включал несколько стадий:

- 1) построение геометрии;
- 2) создание расчетной сетки;
- 3) выбор модели турбулентности и постановка краевых условий;
- 4) обработка результатов.

Построение трехмерной геометрии сепаратора с соосно расположенными трубами, представленного на рис. 1, осуществлялось в программном комплексе Autodesk Inventor, откуда затем импортировалось в ANSYS Fluent. Геометрические размеры основных конструктивных элементов устройства принимались следующими: наружный диаметр внешней и внутренней цилиндрической трубы – 90 и 57 мм, соответственно, толщина внешней и



внутренней цилиндрической трубы – 4 и 3,5 мм, высота внешней и внутренней цилиндрической трубы – 82 и 87 мм, диаметр выходных круглых отверстий, проделанных в пластине – 11 мм. Для получения большой выборки данных размеры прямоугольной щели изменялись. Высота и ширина щели изменялись от 10 до 30 мм и 2,1 до 8,7 мм, соответственно. Количество выходных круглых отверстий составило 18, прямоугольных щелей – 9.

При создании расчетной сетки трехмерной модели сепаратора с соосно расположенными трубами количество ячеек составило 2130420.

В качестве модели турбулентности использовалась модель Transition SST, которая в отличие от классической SST модели дополняется 2 дополнительными уравнениями переноса: для перемежаемости и скоростного напора, который рассчитан для толщины потери импульса. В процессе моделирования на входе в устройство задавалась скорость газового потока 5–10 м/с, на выходе из устройства задавалось атмосферное давление 101325 Па. Плотность мелкодисперсных частиц диоксида кремния принималась равной 2560 кг/м³. Размер частиц варьировался от 1 до 20 мкм. Динамическая вязкость газа принималась равной $18,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Вследствие отсутствия у трехмерной модели сепаратора бункера на его дне задавалось условие прилипания, так как в реальном устройстве там располагаются каналы для отвода частиц [7, 9].

В ходе исследований также оценивалась эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе по следующему выражению:

$$E = 1 - \frac{n_{out}}{n_{in}}, \quad (3)$$

где n_{in} – количество частиц, запущенное в газовый поток; n_{out} – количество частиц, которое осталось в газовом потоке при его выходе из устройства.

Потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами рассчитывались по выражению (4):

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (4)$$

где p_1 – давление на входе в сепаратор, Па; p_2 – давление на выходе из сепаратора равное атмосферному, Па.

Энергетические затраты на прокачку газового потока в сепараторе с соосно расположенными трубами определялись по выражению (5):

$$N = \Delta p G_v, \quad (5)$$

где G_v – объемный расход газового потока, м³/с.

В ходе обработки выборки данных численного моделирования рассчитывалось число Стокса:

$$Stk = \frac{\rho a^2 w_s}{\mu h_s}, \quad (6)$$

где ρ – плотность частиц диоксида кремния, кг/м³; a – диаметр частиц, м; w_s – скорость газа в прямоугольной щели, м/с; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; h_s – высота прямоугольной щели, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По завершении расчетов была получена картина формирования завихрений на плоскости в межтрубном пространстве сепаратора с соосно расположенными трубами (рис. 2). Как было описано выше, каждая струя газа при выходе из прямоугольной щели распадается на 2 струи, которые вследствие конструктивных особенностей сепаратора завихряются.

Результаты исследований показали, что на эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и энергетические затраты в сепараторе с соосно расположенными трубами влияет изменение входной скорости и конструктивных размеров прямоугольной щели внутренней цилиндрической трубы: высота и ширина (рис. 3–6). Изменение данных параметров приводит к установлению определенной структуры движения потока в проточной части сепаратора.

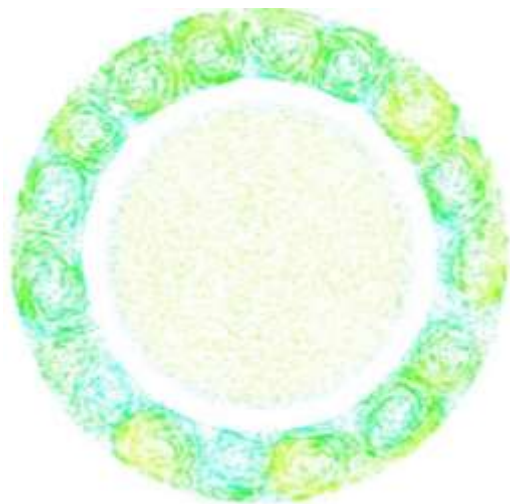


Рис. 2. Формирование завихрений на плоскости в межтрубном пространстве сепаратора с соосно расположенными трубами (вид сверху)
Fig. 2. Vortex formation on the plane in the inter-pipe space of the separator with coaxially arranged pipes (top view)

Для достижения максимальной эффективности улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и минимальных значений потери давления в устройстве, влияющих на энергетические затраты, необходимо образование устойчивой вихревой структуры в межтрубном пространстве (см. рис. 2). В том случае, если вихревая структура нарушается, например, из-за саморазрушения вихрей, вследствие наложения соседних вихрей друг на друга, то эффективность устройства будет уменьшаться, а потери давления станут увеличиваться [15–19]. Нарушение вихревой структуры может быть вызвано неправильной компоновкой устройства, эксплуатацией сепаратора при относительно высоких или низких скоростях газового потока и др.

При входной скорости газового потока 5, 7,5 и 10 м/с эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния при числах Стокса 0,1–15 в среднем составляет 21,5, 39,8 и 46,5%, соответственно. Максимальная эффективность достигается при числах Стокса 10–15, она равна не менее 90% (рис. 3). Потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами при входной скорости газового потока 5, 7,5 и 10 м/с составляют 51,8, 130,7 и 227,9 Па, соответственно. Очевидно, что наиболее рационально создавать входную скорость газового

потока равную 7,5 м/с, при которой достигается высокая эффективность и умеренные потери давления. В ходе исследований было установлено, что наибольшее влияние на эффективность улавливания мелкодисперсных частиц оказывает варьирование размеров ширины щели [14]. При увеличении ширины прямоугольной щели в 2 и 3 раза от начального значения (равного 2,1 мм), эффективность возрастает на 10–15% при числах Стокса в диапазоне 10–44 (рис. 4). При размере ширины щели от 2,1 до 8,7 мм потери давления составляют не более 1 кПа (рис. 6). Изменение высоты прямоугольной щели от 10 до 30 мм сепаратора приводит к изменению эффективности улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния не более чем на 5%. Наиболее высокая эффективность (не менее 90%) достигается при числах Стокса более 50 (рис. 5). При этом потери давления в сепараторе при изменении высоты прямоугольной щели от 10 до 30 мм составляют 0,1 до 2,1 кПа (рис. 6).

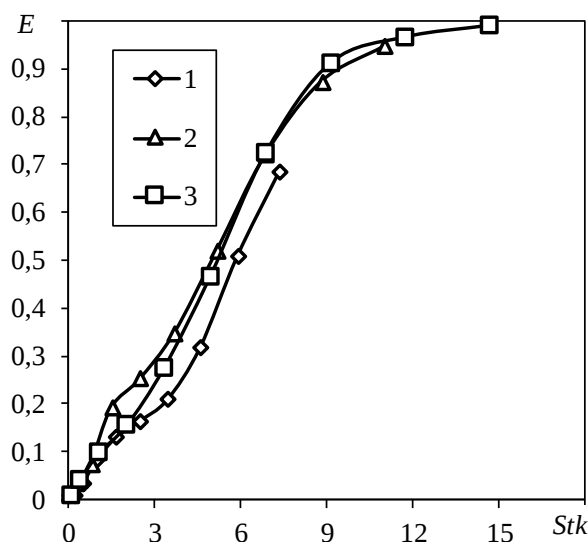


Рис. 3. Зависимость изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от чисел Стокса при различных значениях скорости газового потока, м/с: 1 – 5; 2 – 7,5; 3 – 10
Fig. 3. Dependence of fine particle collection efficiency variation on the Stokes numbers at different values of the gas flow velocity, m/s: 1 – 5; 2 – 7.5; 3 – 10

Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния сепаратором с соосно расположенными трубами в среднем составляет 33,2, 35,8 и 39,8% при

ширине прямоугольной щели 2,1, 4,3 и 8,7 мм, соответственно, при числах Стокса 0,1–44 и входной скорости газового потока 7,5 м/с. Следует отметить, что уменьшение ширины щели приводит к существенному сдвигу «эффективной области» чисел Стокса в больший диапазон. Для улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с эффективностью не менее 50% при ширине щели 2,1, 4,3 и 8,7 мм числа Стокса должны соответствовать значению не менее 23,12 и 5 (рис. 4).

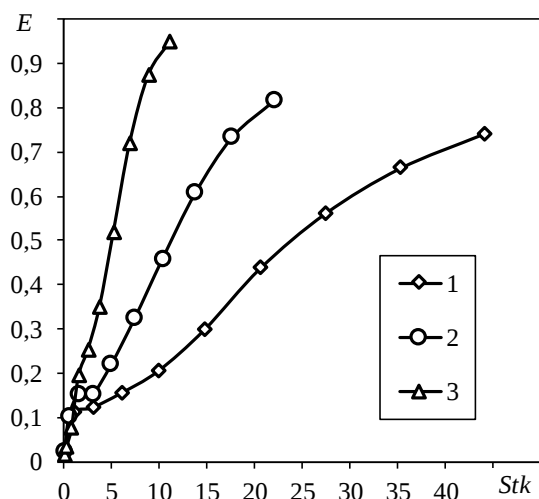


Рис. 4. Зависимость изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от чисел Стокса при различных значениях ширины щели, мм: 1 – 2,1; 2 – 4,3; 3 – 8,7

Fig. 4. Dependence of fine particle collection efficiency variation on the Stokes numbers at different values of the gap width, mm: 1 – 2.1; 2 – 4.3; 3 – 8.7

Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния в сепараторе с соосно расположенными трубами составляет в среднем 71,9, 61,4, 51,1 и 35,8% при высоте прямоугольной щели 10, 15, 20 и 30 мм, соответственно, при числах Стокса от 0,1 до 198,2 и входной скорости газового потока 7,5 м/с (рис. 5).

Потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами при входной скорости газового потока 7,5 м/с и высоте щели 30 мм составляют 130,7, 324,9 и 973,2 Па при ширине щели 2,1, 4,3 и 8,7 мм, соответственно. При этом при изменении высоты прямоугольной щели до значений 10, 15, 20 и 30 мм потери давления в сепараторе составля-

ют 2115,8, 1005,3, 617,4 и 130,7 Па, соответственно, при ширине щели 4,3 мм (рис. 6). Подставив потери давления и объемный расход газа в формулу (6), возможно определить энергетические затраты на прокачку газа в сепараторе с соосно расположенными трубами. Анализ формулы показывает, что при использовании одного сепаратора с соосно расположенными трубами энергетические затраты на прокачку газа в устройстве будут составлять от 1,9 до 31,2 Вт при входной скорости газового потока 7,5 м/с, ширине прямоугольной щели от 2,1 до 8,7 мм и ее высоте от 10 до 30 мм.

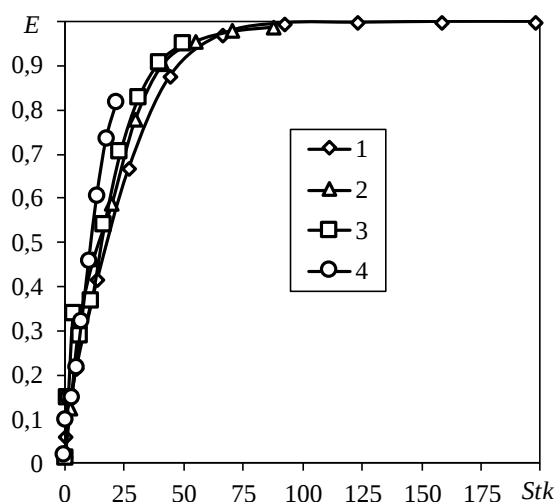


Рис. 5. Зависимость изменения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от чисел Стокса при различной высоте прямоугольной щели, мм: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 30

Fig. 5. Dependence of fine particle collection efficiency variation on the Stokes numbers at different heights of the rectangular gap, mm: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 30

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что максимальная эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и минимальные энергетические затраты на прокачку газового потока в устройстве существенно образом зависят от образования устойчивой вихревой структуры в межтрубном пространстве. В ходе исследований было установлено, что на 2 данных параметра в большей степени влияют конструктивные параметры: ширина и высота прямоугольной щели. При увеличении ширины щели повышается эффективность сепарации частиц

диоксида кремния из газа и снижаются энергетические затраты на прокачку газа. Это вызвано тем, что поток при выходе из щели равномерно распределяется в разные стороны, образуя стабильные завихрения. При уменьшении ширины щели скорость в сужениях увеличивается, и струи газа вылетают из щелей с относительно высокой скоростью, вследствие чего центры вихрей смещаются, и они начинают друг друга разрушать, что сказывается на повышении потери давления и снижении эффективности сепарации частиц из газа [20]. При уменьшении высоты прямоугольной щели повышаются эффективность улавливания мелкодисперсных частиц диоксида кремния и энергетические затраты на прокачку газа. Это вызвано тем, что уменьшение высоты щели приводит к увеличению области, в которой вращается газ. Таким образом, увеличение данной области, с одной стороны, приводит к повышению эффективности сепарации частиц из газа, с другой – к увеличению энергетических затрат.

В ходе исследований было установлено, что оптимальной входной скоростью газового потока является значение 7,5 м/с. При данной скорости эффективность улавливания мелкодисперсных частиц соответствует более высоким скоростям с отклонением $\pm 6\%$. При этом потери давления составляют в 1,74 раза меньше, чем при скорости 10 м/с. Повышению эффективности сепарации частиц диоксида кремния из газового потока и уменьшению энергетических затрат на прокачку газа в устройстве способствует увеличение ширины щели, приводящее к образованию стабильной завихренной структуры газа в межтрубном пространстве. Уменьшение высоты прямоугольной щели приводит к увеличению области движения вихрей, что повышает эффективность сепарации частиц из газа и энергетические затраты на прокачку газа в устройстве. Для достижения эффективности не менее 50% и ширины щели 2,1, 4,3 и 8,7 мм числа Стокса должны соответствовать значению не менее 23, 12 и 5, соответственно, при входной скорости газового потока 7,5 м/с и высоте прямоугольной щели 30 мм. Для достижения эффективности не менее 90% и высоты прямоугольной щели от

10 до 30 мм числа Стокса должны соответствовать значениям равным более 50. Энергетические затраты на прокачку газовой среды, содержащей мелкодисперсные частицы диоксида кремния, в сепараторе с соосно расположенными трубами составляют от 1,9 до 31,2 Вт при входной скорости газового потока 7,5 м/с, ширине прямоугольной щели от 2,1 до 8,7 мм и ее высоте от 10 до 30 мм.

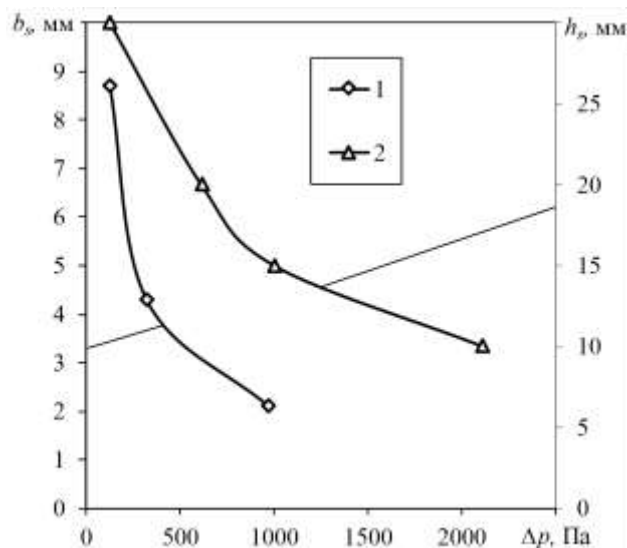


Рис. 6. Зависимость изменения потери давления в сепараторе с соосно расположенными трубами от конструктивных размеров прямоугольных щелей: 1 – ширина щели b_s (входная скорость газового потока и высота щели – 7,5 м/с и 30 мм), 2 – высота щели h_s (входная скорость газового потока и ширина щели – 7,5 м/с и 4,3 мм)

Fig.6. Dependence of pressure loss variations in the separator with coaxially arranged pipes on the design dimensions of the rectangular gaps: 1 – gap width b_s (inlet gas flow velocity and gap height – 7.5 m/s and 30 mm), 2 – gap height h_s (inlet gas flow velocity and gap width – 7.5 m/s and 4.3 mm)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение сепаратора с соосно расположенными трубами в технологической линии, в которой используются плазменные технологии, вместо аппаратов тонкой очистки является целесообразным мероприятием. Помимо высокой эффективности улавливания мелкодисперсных частиц, устройство обладает простой конструкцией и отсутствием движущихся механизмов. В результате затрачиваются минимальные энергетические затраты на прокачку газового потока с частицами диоксида кремния в нем. Вследствие



этого для повышения эффективности улавливания мелкодисперсных частиц возможно применение нескольких сепараторов с соос-

но расположенными трубами, последовательно подключенными друг к другу.

Список литературы

1. Космачев П.В., Власов В.А., Волокитин Г.Г. Наноразмерный SiO_2 , полученный плазменно-дуговым методом // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2018. № 2-3. С. 15–19. <https://doi.org/10.18101/2306-2363-2018-2-3-15-19>
2. Постнов В.Н., Мельникова Н.А., Свистунова О.С., Постнов Д.В., Мурын И.В. Нанокompозиты на основе нафтона, содержащие модифицированный аэросил // Журнал общей химии. 2016. Т. 86. № 10. С. 1756–1758. <https://doi.org/10.1134/S1070363216100273>
3. Ab Rahman I., Ghazali N.A.M., Bakar W.Z.W., Masudi S.A. Modification of glass ionomer cement by incorporating nanozirconia-hydroxyapatite-silica nano-powder composite by the one-pot technique for hardness and aesthetics improvement // Ceramics international. 2017. Vol. 43. Iss. 16. P. 13247–13253. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.022>
4. Cho Y.-S., Moon J.-W. Collection of industrial oil using nanoparticles and porous powders of silica // Archives of Metallurgy and Materials. 2017. Vol. 62. No. 2B. P. 1371–1375. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0211>
5. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Мубаракшина Р.Р. Повышение эффективности аспирационных систем при обработке крахмалистого сырья // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 18–22. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.004>
6. Tofighian H., Amani E., Saffar-Avval M. A large eddy simulation study of cyclones: the effect of sub-models on efficiency and erosion prediction // Powder Technology. 2020. Vol. 360. P. 1237–1252. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.091>
7. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Соловьева О.В., Латыпов Д.Н. Влияние загрязнения пылеочистительного сепаратора мелкодисперсной пылью на энергетические затраты в ходе его эксплуатации // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22. № 8. С. 33–37.
8. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Сепарационная и энергетическая эффективность насадочных аппаратов очистки газов от аэрозолей // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 5. С. 491–498.
9. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Дмитриева О.С. Улавливание мелкодисперсных капель из газового потока в сепарационном устройстве с двутавровыми элементами // Промышленная энергетика. 2020. № 12. С. 47–53. <https://doi.org/10.34831/EP.2020.23.49.008>
10. Song Chengming, Pei Binbin, Jiang Mengting, Wang Bo, Xu Delong, Chen Yanxin. Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators // Powder Technology. 2016. Vol. 294. P. 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.052>
11. Mazyan W.I., Ahmadi A., Ahmed H., Hoorfar M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers // Journal of Aerosol Science. 2017. Vol. 110. P. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.007>
12. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Intensification of gas flow purification from finely dispersed particles by means of rectangular separator // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 451. P. 012211. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012211>
13. Gao Sihong, Zhang Dandan, Fan Yiping, Lu Chunxi. A novel gas-solids separator scheme of coupling cyclone with circulating granular bed filter (C-CGBF) // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 362. P. 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.065>
14. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Influence of elements thickness of separation devices on the finely dispersed particles collection efficiency // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. P. 02073. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822402073>
15. Sagot B., Forthomme A., Ait Ali Yahia L., De La Bourdonnaye G. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications // Journal of Aerosol Science. 2017. Vol. 110. P. 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.009>
16. Tsareva O.V., Balyberdin A.S., Vakhitov M.R., Khar'kov V.V., Dubkova N.Z. Investigation of filter materials for gas cleaning from sulfuric acid // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 421. Iss. 7. P. 072014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/7/072014>
17. Zhang Mingxing, Chen Haiyan, Yan Cuiping, Li Qianqian, Qiu Jie. Investigation to rectangular flat pleated filter for collecting corn straw particles during pulse cleaning // Advanced Powder Technology. 2018. Vol. 29. Iss. 8. P. 1787–1794. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.04.014>
18. Le Dang Khoi, Yoon Joon Yong. Numerical investigation on the performance and flow pattern of two novel innovative designs of four-inlet cyclone separator // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2020. Vol. 150. P. 107867. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107867>
19. Parvaz F., Hosseini S.H., Elsayed K., Ahmadi G. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 201. P. 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001>
20. Venkatesh S., Sakthivel M. Numerical investigation and optimization for performance analysis in Venturi inlet cyclone separator // Desalination and Water Treatment. 2017. Vol. 90. P. 168–179. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21444>

References

1. Kosmachev PV, Vlasov VA, Volokitin GG. Nanosized SiO₂ obtained by plasma-arc method. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya. Fizika = Dorji Banzarov Buryat State University Bulletin. Chemistry. Physics*. 2018;2-3:15–19. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18101/2306-2363-2018-2-3-15-19>
2. Postnov VN, Mel'nikova NA, Svistunova OS, Postnov DV, Murin IV. Nafion nanocomposites containing a modified aerosil. *Zhurnal obshchej himii = Russian Journal of General Chemistry*. 2016;86(10):1756–1758. (In Russ.)
<https://doi.org/10.1134/S1070363216100273>
3. Ab Rahman I, Ghazali NAM, Bakar WZW, Masudi SA. Modification of glass ionomer cement by incorporating nanozirconia-hydroxyapatite-silica nanopowder composite by the one-pot technique for hardness and aesthetics improvement. *Ceramics International*. 2017;43(16):13247–13253.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.022>
4. Cho Y-S, Moon J-W. Collection of industrial oil using nanoparticles and porous powders of silica. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017;62(2B):1371–1375.
<https://doi.org/10.1515/amm-2017-0211>
5. Zinurov VE, Dmitriev AV, Mubarakshina RR. Improving aspiration systems efficiency in processing of starchy raw materials. *Polzunovskiy vestnik*. 2020;2:18–22. (In Russ.)
<https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.004>
6. Tofighian H, Amani E, Saffar-Avval M. A large eddy simulation study of cyclones: the effect of sub-models on efficiency and erosion prediction. *Powder Technology*. 2020;360:1237–1252.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.091>
7. Zinurov VE, Dmitriev AV, Solovjova OV, Latypov DN. Impact of polluting a dust separator with fine dust upon the energy consumption during its operation. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2019;22(8):33–37. (In Russ.)
8. Laptev AG, Basharov MM, Lapteva EA. Separation and energy efficiency of packed apparatuses for purifying gases from aerosols. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017;51(5):491–498. (In Russ.)
9. Zinurov VE, Dmitriev AV, Dmitrieva OS. Catching fine droplets of a gas flow in an I-type separator. *Promyshlennaya energetika*. 2020;12:47–53. (In Russ.)
<https://doi.org/10.34831/EP.2020.23.49.008>
10. Song Chengming, Pei Binbin, Jiang Mengting, Wang Bo, Xu Delong, Chen Yanxin. Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators. *Powder Technology*. 2016;294:437–448. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.052>
11. Mazyan WI, Ahmadi A, Ahmed H, Hoorfar M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers. *Journal of Aerosol Science*. 2017;110:36–42.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.007>
12. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS. Intensification of gas flow purification from finely dispersed particles by means of rectangular separator. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;451:012211.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012211>
13. Gao Sihong, Zhang Dandan, Fan Yiping, Lu Chunxi. A novel gas-solids separator scheme of coupling cyclone with circulating granular bed filter (C-CGBF). *Journal of Hazardous Materials*. 2019;362:403–411.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.065>
14. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS. Influence of elements thickness of separation devices on the finely dispersed particles collection efficiency. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences*. 2018;224:02073.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402073>
15. Sagot B, Forthomme A, Ait Ali Yahia L, De La Bourdonnaye G. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications. *Journal of Aerosol Science*. 2017;110:53–69.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.009>
16. Tsareva OV, Balyberdin AS, Vakhitov MR, Kharkov VV, Dubkova NZ. Investigation of filter materials for gas cleaning from sulfuric acid. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;421(7):072014.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/7/072014>
17. Zhang Mingxing, Chen Haiyan, Yan Cuiping, Li Qianqian, Qiu Jie. Investigation to rectangular flat pleated filter for collecting corn straw particles during pulse cleaning. *Advanced Powder Technology*. 2018;29(8):1787–1794. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.04.014>
18. Le Dang Khoi, Yoon Joon Yong. Numerical investigation on the performance and flow pattern of two novel innovative designs of four-inlet cyclone separator. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2020;150:107867.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107867>
19. Parvaz F, Hosseini SH, Elsayed K, Ahmadi G. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*. 2018;201:223–237.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001>
20. Venkatesh S, Sakthivel M. Numerical investigation and optimization for performance analysis in Venturi inlet cyclone separator. *Desalination and Water Treatment*. 2017;90:168–179. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21444>



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зинуров Вадим Эдуардович,
аспирант,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: vadd_93@mail.com

Дмитриев Андрей Владимирович,
доцент, доктор технических наук,
заведующий кафедрой «Теоретические основы
теплотехники»,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

Бадретдинова Гузель Рамилевна,
магистрант,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: nice.badretdinova@mail.ru

Биккулов Рустем Ядкарович,
ассистент кафедры «Теоретические основы
теплотехники»,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: bikkulov@tnpc.ru

Мадышев Ильнур Наилович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник кафедры «Оборудование
пищевых производств»,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, Россия;
e-mail: ilnur_91@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 02.12.2020; одобрена после рецензирования 29.01.2021; принята к публикации 29.04.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim E. Zinurov,
Postgraduate Student,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: vadd_93@mail.com

Andrey V. Dmitriev,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Theoretical Foundations
of Thermal Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

Guzel R. Badretdinova,
Master's Degree Student,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: nice.badretdinova@mail.ru

Rustem Ya. Bikkulov,
Assistant Professor of the Department of Theoretical
Foundations of Thermal Engineering, Kazan State Power
Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: bikkulov@tnpc.ru

Ilnur N. Madyshev,
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department
of Food Production Equipment, Kazan National Research
Technological University,
68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russia;
e-mail: ilnur_91@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 02.12.2020; approved after reviewing 29.01.2021; accepted for publication 29.04.2021.



Повышение эффективности использования отходов тепловых электрических станций путем увеличения производительности работы установки по отпуску сухой золы

© А.Д. Мехряков, А.Н. Кудряшов, Т.В. Коваль

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – повышение эффективности использования отходов производства угольной энергетики на основе анализа работы установки по отпуску сухой золы Ново-Иркутской теплоэлектростанции ПАО «Иркутскэнерго». Испытания установки проводились при различных режимах работы котельных агрегатов в соответствии со стандартными методиками, принятыми на предприятии. Испытания установки показали, что котлоагрегат станционный № 3 (с паровой нагрузкой 409,2 т/ч и КПД электрофильтров 90,46%) обеспечил следующую эффективность: подача золы составила 7,10 т/ч. При подаче золы от котлоагрегата № 4, работающего с паровой нагрузкой 421,8 т/ч при КПД электрофильтров 94,72%, – 9,19 т/ч. При одновременной работе котлоагрегатов № 3 и № 4 с паровой нагрузкой, соответственно, 397,6 т/ч и 380,7 т/ч, и КПД электрофильтров, соответственно, 90,46% и 94,72% производительность установки составила 14,23 т/ч. В результате исследований были выявлены ограничения в работе установки. Так, скорость воздуха в пневмозолопроводе при транспортировке золы составила 8,0–8,5 м/с, что способствовало работе установки по отпуску сухой золы в пульсирующем режиме. В связи с этим было рекомендовано увеличить скорость воздуха путем увеличения его расхода через струйный насос или перехода на использование трубопровода меньшего диаметра. Анализируя данные испытаний, установлено, что производительность установки по отпуску золы зависит главным образом от паропроизводительности котельных агрегатов, а также от степени очистки дымовых газов в электрофильтрах котлов. Полученные результаты использованы для определения технического состояния, эффективности и надежности работы установки по отпуску сухой золы потребителям Ново-Иркутской теплоэлектростанции.

Ключевые слова: энергетика, сухая зола, зола уноса, золошлаковые отходы, установка по отпуску золы, экология

Для цитирования: Мехряков А.Д., Кудряшов А.Н., Коваль Т.В. Повышение эффективности использования отходов тепловых электрических станций путем увеличения производительности работы установки по отпуску сухой золы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 207–219. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-207-219>

Improving the waste utilisation efficiency of combined heat and power plants by increasing the performance of dry-ash output units

Anton D. Mekhryakov, Alexander N. Kudryashov, Tatyana V. Koval

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The study aims to improve the efficiency of waste utilisation from the coal-fired power industry based on an analysis of the dry-ash output unit operating at the Novo-Irkutsk Combined Heat and Power Plant, JSC “Irkutskenergo”. The unit was tested under various operating conditions of steam generating blocks following the standard methods adopted at the enterprise. The tests showed that the station steam generating block No. 3 (with a steam load of 409.2 t/h and an electrostatic precipitator efficiency of 90.46%) provided an ash supply efficiency of 7.10 t/h. When the ash is supplied from the steam generating block No. 4, operating at a steam load of 421.8 t/h and an electrostatic precipitator efficiency of 94.72%, the ash supply efficiency amounts to 9.19 t/h. Under the simultaneous operation of the steam generating blocks No. 3 and 4 at a steam load of 397.6 and 380.7 t/h, respectively, and an electrostatic precipitator efficiency of 90.46 and 94.72%, respectively, the unit efficiency was 14.23 t/h. As a result, limitations in the unit operation were identified. Thus, the airspeed in the pneumatic ash pipeline during ash transporting was 8.0–8.5 m/s, which facilitated the operation of the dry-ash output unit in a pulsed cycle. It was, therefore, recommended to increase the airspeed by accelerating the flow rate through the jet pump or by using a smaller diameter pipe. The conducted analysis showed that the efficiency of the dry-ash output unit depends mainly on the steam capacity of steam generating blocks, as well as on the

flue gas cleaning efficiency in the steam generator electrostatic precipitators. The obtained results were used to determine the technical state, efficiency and reliability of the dry-ash output unit of the Novo-Irkutsk Combined Heat and Power Plant.

Key words: power engineering, dry ash, fly ash, ash and slag waste, ash release installation, ecology

For citation: Mekhryakov AD, Kudryashov AN, Koval TV. Improving the waste utilisation efficiency of combined heat and power plants by increasing the performance of dry-ash output units. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):207–219. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-207-219>

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые электрические станции (ТЭС) на твердом топливе играют важную роль в обеспечении потребности восточных регионов нашей страны в электрической и тепловой энергии. В качестве твердого топлива на ТЭС в основном используется уголь – самое распространенное в мире и в России энергетическое топливо [1, 2]. Согласно данным международного энергетического агентства¹, в настоящее время мир сжигает больше угля, чем когда-либо за всю историю². Сегодня в мире уделяется большое внимание сжиганию твердого топлива³ [3–9]. Россия является одним из мировых лидеров по производству угля, на долю нашей страны приходится примерно 5% мировой угледобычи [10]. Лидирующие позиции по объемам угледобычи занимают Китай, США и Индия. Россия находится на шестом месте по объемам добычи угля [10–13].

В процессе сгорания топлива происходят сложные химические и фазовые превращения его минерального вещества. В результате превращений минеральной части топлива образуются вещества с новыми свойствами – зола и шлак.

При сжигании угля в топках энергетических котлов ежегодно образуются десятки миллионов тонн золошлаковых отходов (ЗШО), являющихся серьезным источником загрязнения окружающей среды. Отвалы золошлаков ТЭС занимают большие площади, а их содержание требует значительных эксплуатационных затрат, которые влияют на

повышение себестоимости производства энергоносителей.

Золы и шлаки, претерпев в топках термическую обработку при высоких температурах, аккумулируют в себе огромные запасы тепловой и химической энергии. При этом они становятся ценнейшим сырьем при переработке материалов, изделий и конструкций, пригодных для современного строительства.

Использование золы и шлаков ТЭС – задача весьма актуальная, что подтверждается многочисленными исследованиями российских и зарубежных специалистов [14–21]. При этом мировая практика подтвердила высокую эффективность применения золы ТЭС в производстве строительных материалов [16–19]. Минимизации экологических последствий от промышленных отходов можно достичь только полной их утилизацией. Поэтому многие развитые страны пошли по пути использования в качестве минерального сырья не природных, а техногенных материалов и изготовления из них принципиально новых видов высококачественной продукции. Россия в этом отношении значительно уступает многим странам [8, 10–13].

В Западной Европе и Японии при ТЭС практически ликвидированы золоотвалы. Сухая зола поступает в силосы, построенные рядом с главными корпусами ТЭС.

Организованная система утилизации золошлаковых материалов позволит решить сложную проблему снижения значительных издержек энергетической компании на строительство и эксплуатацию золоотвалов.

¹Medium Term Coal Market Report 2016. Paris: International Energy Agency, 2016. 141 p. <https://doi.org/10.1787/mtrcoal-2016-en> (20.09.2020).

²Coal information: overview. Paris: International Energy Agency, 2017. 8 p. <https://doi.org/10.1787/coal-2017-en> (20.09.2020).

³The US Coal Crash – Evidence for Structural Change. London: Carbon Tracker Initiative, 2015. 48 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://carbontracker.org/reports/the-us-coal-crash/> (20.09.2020).



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поиск методов утилизации золы требует знания ее физико-химических свойств. Главные составляющие золошлаковых материалов – это оксиды: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO . Небольшая доля приходится на сульфаты CaSO_4 , MgSO_4 , FeSO_4 ; в меньших количествах присутствуют фосфаты, оксиды щелочных металлов. Зола практически включает все элементы периодической таблицы Д.И. Менделеева. В золошлаковых материалах могут содержаться биогенные (фтор, марганец, кобальт, свинец, медь и др.) и токсические микроэлементы (бор, ванадий, мышьяк, стронций, бериллий и др.).

Элементарный состав ЗШО сильно изменяется в зависимости от вида используемых углей, технологии сжигания и удаления отходов. Зола одного и того же вида угля имеет разные свойства, тем более от разных видов углей [1].

Особую роль в формировании свойств золы играют гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, кальцит CaCO_3 и доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, а также продукты их частичного термического разложения – ангидрит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и свободный оксид кальция CaO . В золе всех типов содержатся сульфаты и карбонаты кальция.

Из новообразованных материалов следует отметить так называемые клинкерные минералы – силикаты, алюминаты и ферриты кальция различной основности, определяющие способность намываемых золошлаковых материалов к самопроизвольной цементации.

Практически во всех золах содержатся органические включения (недожог) в виде кокса и полукокса – в форме либо самостоятельных частиц, либо включений в крупные фракции золы.

Проблема утилизации зольных масс тепловых электростанций остается весьма актуальной задачей для современных городов Сибири. Зольные массы занимают большие участки дорогостоящей земли вблизи городов, нарушая экологическое равновесие и загрязняя почвы, грунтовые и поверхностные воды.

В развитых странах не стремятся переводить станции, работающие на угле, на газ и мазут. Более того, и у нас, и за рубежом, все

больше ученых, экологов утверждают, что ТЭЦ, работающие на твердом топливе [2, 3, 5], должны рассматриваться как предприятия энерготехнологического комплекса регионов. Они кроме выработки тепловой и электрической энергии должны способствовать производству из побочных продуктов строительных материалов.

Золошлаковые отходы могут использоваться как добавки и наполнители при производстве большого перечня строительных материалов: цемента, бетонов, растворов, кирпича и т.д. Они хорошо себя зарекомендовали при укладке в земляное полотно автомобильных дорог. Определенную ценность ЗШМ имеют в сельском хозяйстве при производстве удобрений. Очень перспективной является глубокая (комплексная) переработка ЗШО с получением глинозема, кремнезема, концентрата железа и целого ряда редкоземельных материалов. Известно более 300 технологий использования ЗШО.

Безотходное использование ископаемых углей особенно выгодно государству со стратегической точки зрения, поскольку без дополнительных затрат удвоится объем производства вяжущих материалов, кроме того, за счет угля значительно снизится потребление газа внутри страны, что позволит увеличить объемы его продаж за рубеж [1].

Более 40 лет зола-унос и золошлаковая смесь с золоотвала ТЭЦ-1 ПАО «Иркутскэнерго» успешно используются в производстве цемента на ОАО «Ангарскцемент». В настоящее время золошлаковые отходы, накопленные на территории Иркутской области, используются при тушении полигона лигнина в г. Зима. Планируется использование ЗШО при строительстве железнодорожного подъездного пути на ТЭЦ-10 ПАО «Иркутскэнерго» от станции «Суховская», автодороги Иркутск – Листвянка.

Одним из направлений повышения эффективности использования отходов тепловых электрических станций Иркутской области может быть увеличение производительности работы установки по отпуску сухой золы. Одна такая установка находится на Ново-Иркутской теплоэлектроцентрали ПАО «Иркутскэнерго» (Н-И ТЭЦ).

ИССЛЕДОВАНИЯ

На Н-И ТЭЦ установлено 8 котлоагрегатов, из них БКЗ-420-140 ст. № 1–4 (ст. № – станционный номер), БКЗ-500-140 ст. № 5–7, БКЗ-820-140 ст. № 8. В настоящее время на Н-И ТЭЦ сжигают в азейский, мугунский и ирбейский бурые угли. Котельные агрегаты Н-И ТЭЦ ст. № 1, 2 оборудованы золоулавливающими установками МВ⁴ УО «ОРГРЭС» (установки по отпуску мокрых золоуловителей с трубами Вентури типа МВ – скрубберы с трубами Вентури), на котлах ст. № 3–8 – электрофилтры.

Первоначально установка по отпуску сухой золы (УОСЗ) предполагала отбор сухой золы от электрофилтров котлоагрегатов ст. № 3–8 и транспортирование на склад сухой золы, расположенный вне главного корпуса. Протяженность трассы пневмопроводов от места забора в главном корпусе до осадительных бункеров на складе золы составляет около 150 м.

В настоящее время проект разработан и введен в эксплуатацию для 1-й очереди установки по отпуску сухой золы, то есть от котельных агрегатов ст. № 3, 4.

Поскольку установленные с котлоагрегатами ст. № 3, 4 электрофилтры двухкорпусные, то золоудаление выполнено для каждого корпуса самостоятельным, то есть по две золоудаляющих системы на каждом котле.

Установка по отпуску сухой золы 1-й очереди включает следующие узлы:

- установка по отбору сухой золы в главном корпусе;
- склад сухой золы;
- эстакады пневмозолопроводов;
- установка аварийного сброса золы в багерной насосной № 1;
- оборудование и трубопроводы сжатого воздуха.

Принципиальная схема установки по отбору сухой золы 1-й очереди представлена на рисунке. В настоящее время на каждой золоудаляющей системе установлено по одному циклону (Ц) $D_y = 530$ мм над промбункерами (ПБ).

Пневмозолопроводы от бункеров электрофилтров входят в промбункеры на той же отметке, что и в циклоны.

В циклоне происходит гашение и оседание столба золы, которая подается через мгалку (М) в ПБ. Запыленный воздух из циклона трубопроводом $D_y = 200$ мм направляется в газоход перед электрофилтром.

Далее для разделения систем пневмозолоудаления (ПЗУ) и гидрозолоудаления (ГЗУ) под промбункером устанавливается двухходовый переключатель, с помощью которого сбрасывается зола или в золосмеситель, или в струйный насос (СтрН), установленный рядом с золосмесителем.

Производительность струйного насоса зависит от высоты столба золы до него. Проектная высота столба золы составляет около 4 м, а производительность, соответственно, 7–8 т/ч, что в два раза больше, чем часовой выход золы на один корпус электрофилтра (на азейском угле с учетом форкамеры 4 т/ч или $4,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ при насыпной плотности золы $0,9 \text{ т}/\text{м}^3$).

В главном корпусе установлены 4 струйных насоса, от которых по четырем пневмозолопроводам $D_y = 150$ мм зола направляется на склад сухой золы.

Бункер сухой золы (БСЗ) рассчитан на установку 4-х силосов емкостью 100 м^3 каждый. В настоящее время для 1-й очереди (котельные агрегаты ст. № 3, 4) установлены 2 силоса: БСЗ-1 и БСЗ-2.

Склад сухой золы находится на расстоянии около 30 м от главного корпуса.

Для трассировки и крепления пневмозолопроводов установлены две стойки, размещенные между газоходами котлоагрегатов ст. № 3, 4.

Каждый пневмозолопровод перед врезкой в силос делится на два, для чего предусмотрены двухходовые переключатели силоса (ПДС), которые позволяют сбрасывать золу из каждого корпуса электрофилтра на оба силоса.

Загрузка золы в автоцементовозы произ-

⁴Указания по расчету и проектированию золоуловителя с трубой Вентури типа МВ при модернизации газоочистного оборудования тепловых электростанций. Утв. 10.10.1978. М.: «Уралтехэнерго», Всесоюз. теплотехн. ин-т им. Ф.Э. Дзержинского.



водится под силосом, для чего предусмотрен затвор дисковый (ЗД) с электроприводом, что позволяет дистанционно управлять разгрузкой золы. Дисковый затвор соединен гибким шлангом с загрузочным устройством (ЗУ). Последнее устанавливается на горловину загрузочного патрубка автоцементовоза.

Вытесненный из автоцементовоза при загрузке запыленный воздух забирается вентилятором, соединенным гибким шлангом с загрузочным устройством и далее направляется обратно в силос.

Запыленный воздух из силосов, проходя через рукавные фильтры, вентилятора-ми выбрасывается в атмосферу.

Рукавные фильтры и вентиляторы размещаются в отдельном помещении на отметке 12,6 м.

Организация транспортирования и отгрузки сухой золы осуществляется следующим образом. Процесс транспортирования золы от котлоагрегатов ст. № 3, 4 на склад автоматизирован. Управление электроприводами арматуры компрессоров осуществляется со щитов контрольно-измерительными приборами, расположенных в отдельном помещении, пристроенном к багерной насосной № 1.

Поскольку ограничения, связанные со стесненными условиями при размещении вновь запроектированного оборудования в главном корпусе, не позволили установить промбункеры необходимого объема, то процесс автоматизации транспортирования золы от котлоагрегатов ст. № 3, 4 сведен к организации поочередного опорожнения промбункеров по каждой линии (всего 4 линии ПЗУ с котлоагрегатов ст. № 3, 4), начиная с верхнего уровня первого промбункера и далее через 8 мин включения каждой последующей линии транспортирования золы.

Промежуток времени в 24 мин выбран из расчета емкости промбункеров: при выходе золы от одного корпуса электрофильтра $4,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ или $0,07 \text{ м}^3/\text{мин}$ – фактически этот объем составляет $1,6 \text{ м}^3$.

Так как для 1-й очереди УОСЗ установлено два силоса емкостью по 100 м^3 каждый, то заполнение одного силоса происходит за 6 ч (ориентировочно выход очаговых остатков от

котлоагрегатов ст. № 3, 4 равен $4,4 \cdot 4 = 17,6 \text{ м}^3/\text{ч}$), а разгрузка происходит за 4 ч при интервале 1 машина/40 мин или 12 машин (144 т)/1 смена.

Таким образом, при непрерывной двухсменной загрузке автоцементовозов количество загруженных машин составит 24 шт. (заполнение силосов поочередное).

В промежуток времени между сменами (ночное время) происходит заполнение силосов или переключение системы на ГЗУ.

В начале 2018 г. были проведены испытания установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ для определения ее технической производительности с последующим повышением производительности. Испытания УОСЗ проводились при различных режимах работы котельных агрегатов с организацией подачи золы отдельно от котлоагрегата ст. № 3, от котлоагрегата ст. № 4 и одновременной подачи от котлоагрегатов ст. № 3, 4.

Также были проведены опыты по определению расхода воздуха и аэродинамического сопротивления в пневмозолопроводах котлоагрегатов № 3, 4 и отсасывающем трубопроводе. Опыты проводились при следующих режимах:

1. В работе были компрессор К-2, струйный насос СтрН-3А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Промбункер электрофильтра котлоагрегата ст. № 3 опорожнялся через золосмывной аппарат в канал ГЗУ, котлоагрегат ст. № 4 находился в останове. Арматура на трубопроводе сжатого воздуха от общестанционной сети была закрыта. Воздух от струйного насоса по пневмозолопроводу подавался в БСЗ-1.

2. В работе были компрессор К-2, струйный насос СтрН-4А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Промбункер электрофильтров котлоагрегата № 3 опорожнялся через золосмывной аппарат в канал ГЗУ, котлоагрегат № 4 находился в останове. Арматура на трубопроводе сжатого воздуха от общестанционной сети была закрыта. Воздух от струйного насоса по пневмозолопроводу подавался в БСЗ-1.

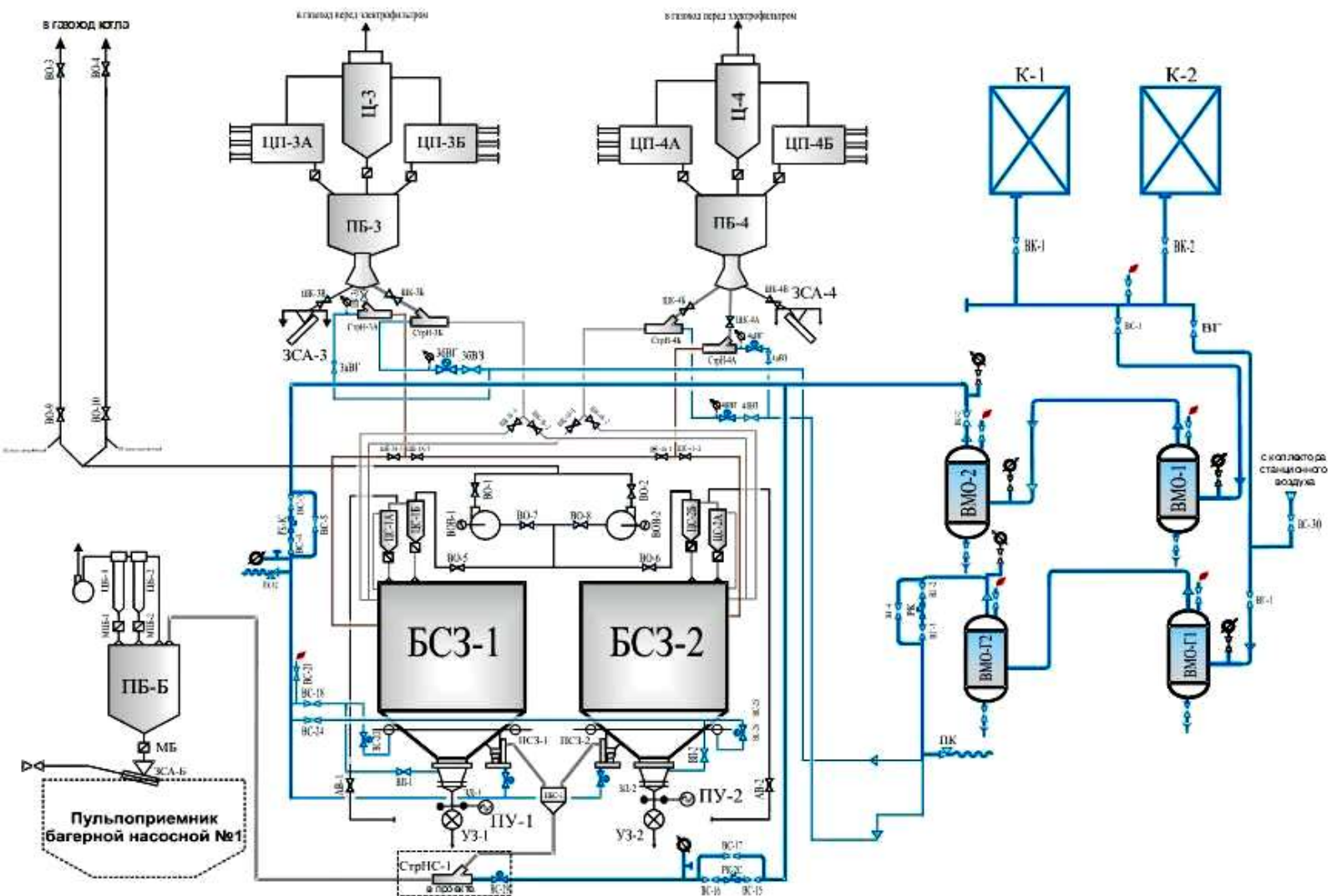


Схема установки отпуска сухой золы
 Dry ash release installation diagram



3. В работе были струйные насосы СтрН-3А, СтрН-4А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Промбункер электрофилтра котлоагрегата ст. № 3 опорожнялся через золосмывной аппарат в канал ГЗУ, котлоагрегат ст. № 4 находился в останове. Воздух на струйные насосы подавался от коллектора станционного воздуха. Воздух от струйных насосов по пневмозолопроводам подавался в БСЗ-1.

Определение технической производительности установки проводилось при следующих режимах:

1. В работе были компрессор К-2, струйный насос СтрН-3А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Зола из промбункера электрофилтров котлоагрегата ст. № 3 срабатывалась через пневмозолопровод в БСЗ-1, котлоагрегат № 4 находился в останове. Арматура на трубопроводе сжатого воздуха от общестанционной сети была закрыта. Тепловая нагрузка котлагрегата ст. № 3 поддерживалась постоянной при $D_{\text{нп}} = 409$ т/ч.

2. В работе были компрессор К-1, струйный насос СтрН-4А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Зола из промбункера электрофилтров котлоагрегата ст. № 4 срабатывалась через пневмозолопровод в БСЗ-1, промбункер электрофилтров котлоагрегата ст. № 3 опорожнялся через золосмывной аппарат в канал ГЗУ. Арматура на трубопроводе сжатого воздуха от общестанционной сети была закрыта. Тепловая нагрузка котлоагрегата ст. № 4 поддерживалась постоянной при $D_{\text{нп}} = 421$ т/ч.

3. В работе были струйные насосы СтрН-3А, СтрН-4А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Зола из промбункеров электрофилтров котлоагрегатов ст. № 3, 4 срабатывалась через пневмозолопроводы в БСЗ-1. Воздух на струйные насосы подавался от коллектора станционного воздуха. Тепловая нагрузка котлоагрегата ст. № 3 поддерживалась постоянной при $D_{\text{нп}} = 398$ т/ч, $t_{\text{нп}} = 550^{\circ}\text{C}$. Тепловая нагрузка котлоагрегата ст. № 4 поддерживалась постоянной при $D_{\text{нп}} = 381$ т/ч.

Контроль уровней золы в БСЗ-1 и БСЗ-2 показал увеличение уровней обоих бункеров в режиме наполнения БСЗ-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных испытаний установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ для определения ее технической производительности с последующим повышением производительности были получены результаты, которые представлены в табл. 1–3.

Испытания установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ для определения технической производительности показали, что производительность УОСЗ при работе от котлоагрегата ст. № 3 с паровой нагрузкой 409,2 т/ч и КПД электрофилтров 90,46% составила 7,10 т/ч, а при работе от котлоагрегата ст. № 4 с паровой нагрузкой 421,8 т/ч и КПД электрофилтров 94,72% – 9,19 т/ч. При одновременной работе котлоагрегата ст. № 3 с паровой нагрузкой 397,6 т/ч КПД электрофилтров 90,46% и котлоагрегата ст. № 4 с паровой нагрузкой 380,7 т/ч, КПД электрофилтров 94,72% производительность УОСЗ составила 14,23 т/ч. Таким образом, производительность установки преимущественно зависит от паропроизводительности котельных агрегатов, зола от которых транспортируется на склад сухой золы, а также, анализируя полученные данные (представленные в табл. 1–3), можно отметить, что на производительность оказывает значительное влияние на степень очистки дымовых газов в электрофилтрах котельных агрегатов.

Необходимо отметить некоторые особенности в работе установки:

- шаровые краны пневмозолопроводов не обеспечивали полное перенаправление потока золовоздушной смеси;

- скорость воздуха в пневмозолопроводе при транспортировке золы от струйных насосов котлоагрегатов ст. № 3, 4 до БСЗ-1,2 составляла 8,0–8,5 м/с, которая не обеспечивала надежный режим работы установки – установка работала в пульсирующем режиме;

- скорость воздуха в трубопроводе очищенного воздуха от напора ВОВ-1,2 до сброса в газоход котельного агрегата на участке за электрофилтром составляла 22,0 м/с, что

Таблица 1. Расчет технической производительности установки по отпуску сухой золы
Table 1. Calculation of technical capacity of the dry ash release installation

Параметр	Обозна- чение	Размер	Формула или обоснование	Значение			
				СтрН- 3А	СтрН- 4А	СтрН- 3А	СтрН-4А
				к/а № 3	к/а № 4	к/а № 3, 4	
Расход перегретого пара	D_{III}	т/ч	данные испытаний	409,2	421,8	397,6	380,7
Массовый расход золы в уста- новке по отпуску сухой золы через струйный насос	$G_{3Л}^{КА}$	кг/с	табл. 3	1,993	2,579	1,948	2,047
Коеффициент полезного дей- ствия котельного агрегата (брутто)	$\eta_{КА}$	%	$\eta_{КА} = 100 - \sum q$, значения потерь получены на ос- нове анализа топлива и дымовых газов	93,328	92,978	92,708	92,971
Степень очистки дымовых газов (с учетом неработающих полей)	$\eta_{ЭФ}$	—	табл. 2	0,9046	0,9472	0,9046	0,9472
Расчетный расход топлива	B_P	т/ч	$B_P = \frac{Q_K}{Q_P \cdot \frac{\eta_{КА}}{100}} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot 10^3$	67,4	68,9	59,6	59,9
Массовый расход золы от к/а	$G_{3Л}^{КА}$	т/ч	$G_{3Л}^{КА} = B_P \cdot \alpha_{УН} \cdot A^Г$	7,94	9,81	7,76	7,79
		кг/с		2,207	2,726	2,156	2,164
Массовый расход золы в установке по отпуску сухой золы	$G_{3Л}$	т/ч	$G_{3Л} = G_{3Л}^{КА} - \left(G_{3Л}^{КА} + \right.$ $\left. + G_{3Л}^{ВОЗВР}\right) \cdot \left(1 - \eta_{ЭФ}\right)$	7,18	9,29	7,01	7,37
		кг/с		1,993	2,579	1,948	2,047
Массовый расход золы в БСЗ-1	$G_{3Л}^{БСЗ-1}$	кг/с	$G_{3Л}^{БСЗ-1} = \sum G_{3Л}$	1,993	2,579	3,995	
Степень очистки воздуха оса- дительной станции БСЗ-1	$\eta_{БСЗ-1}$	—	табл. 3	0,9894			
Техническая производи- тельность установки по отпуску сухой золы	$G_{3Л}^{УОСЗ}$	кг/с	$G_{3Л}^{УОСЗ} = G_{3Л}^{БСЗ-1} \cdot \eta_{БСЗ-1}$	1,972	2,552	3,953	
		т/ч		7,10	9,19	14,23	

обеспечивало режим работы без образования подстилающего слоя;

- объемный расход воздуха через вентилятор очищенного воздуха превышал расход воздуха через пневмозолопроводы;

- производительности компрессорной установки было недостаточно для одновременной работы двух насосов;

- производительности вентилятора очищенного воздуха (ВОВ-1,2) было достаточно для аспирации воздуха из силосов при одновременной работе струйных насосов котлоагрегатов ст. № 3, 4;

- возврат очищенного воздуха осуществ-

лялся в газоход котельного агрегата на участке за электрофильтром;

- местами нарушена тепловая изоляция трубопроводов.

В результате анализа полученных результатов для увеличения производительности установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ было рекомендовано провести следующие мероприятия:

- увеличить скорость воздуха в пневмозолопроводе для обеспечения режима работы установки без образования подстилающего слоя. При измеренных режимах работы (концентрации золы в золовоздушной смеси)



Таблица 2. Расчет степени очистки газов в корпусах электрофильтров котлоагрегатов ст. № 3, 4
Table 2. Calculation of gas purification degree in electric filter casings of boilers at the station no. 3, 4

Параметр	Обозначение	Размер	Формула или обоснование	Значение	
				котлоагрегат ст. № 3	котлоагрегат ст. № 4
Степень очистки дымовых газов (при всех работающих полях)	$\eta_{ЭФ}^{МАКС}$	–	данные испытаний	0,9807	0,9802
Количество полей в одном корпусе электрофильтра	$N^{НОМ}$	шт	характеристика оборудования	4	4
Степень очистки одного поля	η_{II}	–	$\eta_{II} = 1 - (1 - \eta_{ЭФ}^{МАКС})^{1/N^{НОМ}}$	0,627274	0,624883
Кол-во работающих полей в корпусе А	N^A	шт	данные Ново-Иркутской теплоэлектроцентрали ПАО «Иркутск-энерго»	2	3
Кол-во работающих полей в корпусе Б	N^B	шт	данные Ново-Иркутской теплоэлектроцентрали ПАО «Иркутск-энерго»	3	3
Степень очистки дымовых газов (с учетом неработающих полей*)	$\eta_{ЭФ}$	–	$\eta_{ЭФ} = 1 - ((1 - \eta_{II})^{N^A} + (1 - \eta_{II})^{N^B}) / 2$	0,9046	0,9472

Примечание: *В период проведения испытаний с 21.03.18 по 18.05.18 были отключены поля 1А, 3А, 3Б электрофильтра котлоагрегата ст. № 3 и поля 2А, 1Б электрофильтра котлоагрегата ст. № 4.

и существующего трубопровода Ø159×9 мм минимальная скорость воздуха рекомендуется 21,0–32,3 м/с [14–16, 20]. Скорость воздуха возможно увеличить путем возрастания расхода через струйный насос или переходом на трубопровод меньшего диаметра. Для увеличения расхода через трубопровод Ø159×9 мм при избыточном давлении сжатого воздуха перед насосом 0,2942 Н/мм² (3,0 кгс/см²) расчетный диаметр сопел составляет 25–28 мм, расчетный расход воздуха на 1 насос при этом составляет 22–26 м³/мин;

- провести ревизию шаровых кранов, установленных на пневмозолопроводах, которые должны обеспечивать полное открытие и полное перекрытие золовоздушного потока;

- провести ревизию струйных насосов. При этом установить сопло эжектирующего воздуха, конфузор, камеру смешения и диффузор соосно пневмозолопроводу. В случае замены фильтровальной ткани аэроднища рекомендовалось рассмотреть возможность установки металлической беспровальной сетки для более надежной работы;

- выявить и устранить места присоса воздуха в БСЗ-1, БСЗ-2 и трубопроводе очи-

щенного воздуха на участке перед вентилятором.

Кроме того, необходимо изменить схему возврата очищенного воздуха – трубопровод очищенного воздуха завести в газоход котельного агрегата на участке до электрофильтра или в форкамеру электрофильтра, а также восстановить изоляцию пневмозолопроводов и трубопровода очищенного воздуха на участках от стены здания цеха до склада сухой золы.

Для снижения абразивного износа напорных пневмозолопроводов было предложено рассмотреть возможность их замены на трубопроводы, выполненные из более износостойких материалов, например трубы с алюмотермическим покрытием или трубы с каменным литьем [11, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения использования отходов [21] тепловых электрических станций в Иркутской области выполнена оценка работы установки по отпуску сухой золы Н-И ТЭЦ с целью увеличения ее производительности.

Испытания установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ для определе-

Таблица 3. Определение степени очистки воздуха в осадительной станции БСЗ-1
Table 3. Determination of air purification degree in the Dry Ash Hopper-1 precipitation station

Параметр	Обозначение	Размер	Формула или обоснование	Значение
Масса фильтра до опыта	$M_{\phi}^{OB'}$	г	данные испытаний	0,1076
Масса фильтра после опыта	$M_{\phi}^{OB''}$	г	данные испытаний	0,4148
Масса золы, отделенная фильтром	ΔM_{ϕ}^{OB}	г	$\Delta M_{\phi}^{OB} = M_{\phi}^{OB''} - M_{\phi}^{OB'}$	0,3072
Объем отобранной пробы	V_{Π}^{OB}	м ³	данные испытаний	0,005
Концентрация золы в воздухе	$\mu_{3Л}^{OB}$	г/м ³	$\mu_{3Л}^{OB} = \frac{\Delta M_{\phi}^{OB}}{V_{\Pi}^{OB}}$	61,4
		кг/м ³		0,0614
Диаметр трубопровода внешний	D_{OB}	мм	данные испытаний	219
Толщина стенки трубопровода	s_{OB}	мм	данные испытаний	9,5
Диаметр трубопровода внутренний	d_{OB}	мм	$d_{OB} = D_{OB} - 2 \cdot s_{OB}$	200
		м		0,2
Площадь сечения трубопровода	F_{OB}	м ²	$F_{OB} = \frac{\pi d_{OB}^2}{4}$	0,031416
Скорость воздуха в трубопроводе	ω_{OB}^B	м/с	данные испытаний	22
Объемный расход воздуха в трубопроводе очищенного воздуха	Q^{OB}	м ³ /с	$Q^{OB} = \omega_{OB}^B \cdot F_{OB}$	0,6912
Массовый расход золы в трубопроводе очищенного воздуха	$G_{3Л}^{OB}$	кг/с	$G_{3Л}^{OB} = \mu_{3Л}^{OB} \cdot Q^{OB}$	0,0425
Массовый расход золы в установке по отпуску сухой золы от котлоагрегата № 3	$G_{3Л}^{KA3}$	кг/с	табл. 2	1,948
Массовый расход золы в установке по отпуску сухой золы от котлоагрегата № 4	$G_{3Л}^{KA4}$	кг/с	табл. 2	2,047
Массовый расход золы в БСЗ-1	$G_{3Л}^{БСЗ-1}$	кг/с	$G_{3Л}^{БСЗ-1} = G_{3Л}^{KA3} + G_{3Л}^{KA4}$	3,995
Степень очистки воздуха осадительной станции БСЗ-1	$\eta_{БСЗ-1}$	–	$\eta_{БСЗ-1} = \frac{G_{3Л}^{БСЗ-1} - G_{3Л}^{OB}}{G_{3Л}^{БСЗ-1}}$	0,9894

ния технической производительности показали, что производительность УОСЗ при работе от котлоагрегата ст. № 3 с паровой нагрузкой 409,2 т/ч и КПД электрофильтров 90,46% составила 7,10 т/ч, а при работе от котлоагрегата ст. № 4 с паровой нагрузкой 421,8 т/ч и КПД электрофильтров 94,72% – 9,19 т/ч. При одновременной работе котлоагрегата ст. № 3 с паровой нагрузкой 397,6 т/ч КПД электрофильтров 90,46% и котлоагрегата ст. № 4 с паровой нагрузкой 380,7 т/ч, КПД электрофильтров 94,72% произво-

дительность УОСЗ составила 14,23 т/ч.

На основании проведенных испытаний проведен анализ полученных результатов, определена производительность установки, степень очистки воздуха в осадительной станции БСЗ-1, аэродинамические характеристики пневмозолопроводов и трубопровода очищенного воздуха. Полученные результаты использованы для определения технического состояния, эффективности и надежности работы установки.



Список литературы

1. Яновский А.Б. Уголь: битва за будущее // Уголь. 2020. № 8. С. 9–14. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-8-9-14>
2. Кузнецов А.В., Бутаков Е.Б. Исследование влияния механической активации на горение угольного топлива // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. С. 37–44.
3. Табакаев Р.Б., Хаустов С.А., Черкашина Г.А., Казаков А.В. Низкосортное топливо Томской области: перспективы энергетического использования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 9. С. 106–113.
4. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Головтеева А.Н., Сиваковский А.М. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для российских ТЭС // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 60–72. <https://doi.org/10.1134/S0040363619040064>
5. Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., Медведев В.В. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органикоугольные топливные композиции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 72–82.
6. Cai Lei, Zou Chun, Liu Yang, Zhou Kai, Han Qing. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O₂/H₂O atmospheres // Fuel. 2015. Vol. 139. P. 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.038>
7. Briceland C.L., Khinkis M., Waibel R.T. Combustion characteristics of fine-ground coal // Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack: Proceedings International Symposium. Project 61052 quarterly technical report (Effect of particle size). 1982. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osti.gov/biblio/6547443-combustion-characteristics-fine-ground-coal-projectquarterly-technical-report-march-may-effect-particlesize> (20.09.2020).
8. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2017 года // Уголь. 2018. № 3. С. 58–73. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73>
9. Guttikunda S.K., Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India // Atmospheric Environment. 2014. Vol. 92. P. 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057>
10. Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2020 года // Уголь. 2021. № 3. С. 27–43. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-3-27-43>
11. Яновский А.Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России // Уголь. 2017. № 8. С. 10–14. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-10-14>
12. Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2019 года // Уголь. 2020. № 3. С. 54–69. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-3-54-69>
13. Глинина О.И. Угольная промышленность в России: 295 лет истории и новые возможности // Уголь. 2017. № 10. С. 4–11. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-10-4-10>
14. Афанасьева О.В., Мингалева Г.Р., Добронравов А.Д., Шамсутдинов Э.В. Комплексное использование золошлаковых отходов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7-8. С. 26–36. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-7-8-26-36>
15. Рябов Ю.В., Делицын Л.М., Ежова Н.Н., Сударева С.В. Методы обогащения золошлаковых отходов угольных ТЭС и пути их вовлечения в хозяйственный оборот (обзор) // Теплоэнергетика. 2019. № 3. С. 3–24. <https://doi.org/10.1134/S0040363619030056>
16. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Качурин Н.М., Стась Г.В. Параметры активации золы уноса в качестве вяжущего при изготовлении бетонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 8. С. 173–179. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2223>
17. Bowman S.D. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) // Background and Application: guidelines for investigating geologic hazards and preparing engineering geology reports, with a suggested approach to geologic hazard ordinances in Utah. Utah: The University of Utah, 2016. P. 198–203.
18. Rashad A.M. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 87. No. 1. P. 717–725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.080>
19. Da Silva P.R., De Brito J. Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler // Advances in Concrete Construction. 2013. Vol. 1. Iss. 1. P. 65–84. <https://doi.org/10.12989/acc.2013.1.1.065>
20. Харлеев Е.П. Золошлакоотвалы годичного регулирования дифференцированных потоков золы и шлака угольных ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 21–32. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-7-8-21-32>
21. Коваль Т.В., Абдульменова А.К. Использование отходов ТЭС ПАО «Иркутскэнерго» // Молодежный вестник ИрГТУ. 2020. Т. 10. № 1. С. 126–130.

References

1. Yanovsky AB. Coal: the battle for the future. *Ugol'*. 2020;8:9–14. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-8-9-14> (In Russ.)
2. Kuznetsov AV, Butakov EB. Investigation of mechanical activation influence on coal fuel combustion. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016;327(6):37–44. (In Russ.)
3. Tabakaev RB, Khaustov SA, Cherkashina GA, Kaz-

kov AV. Low-grade fuels of Tomsk region: prospects for energy use. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015;326(9):106–113. (In Russ.)

4. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Golovteeva AN, Sivakovskii AM. Optimal Choice of the Best Available Technologies for Russian Thermal Power Plants. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019;4:60–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363619040064>

5. Kurgankina MA, Vershinina KYu, Ozerova IP, Medvedev VV. Thermal power plants switching from traditional fuels to coal water slurries containing petrochemicals. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(9):72–82. (In Russ.)

6. Cai Lei, Zou Chun, Liu Yang, Zhou Kai, Han Qing. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O₂/H₂O atmospheres. *Fuel*. 2015;139:198–205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.038>

7. Briceland CL, Khinkis M, Waibel RT. Combustion characteristics of fine-ground coal. In: *Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack: Proceedings International Symposium. Project 61052 quarterly technical report (Effect of particle size)*. 1982. Available from: <https://www.osti.gov/biblio/6547443-combustioncharacteristics-fine-ground-coal-project-quarterlytechnical-report-march-may-effect-particle-size> [Accessed 20th September 2020].

8. Tarazanov IG. Russia's coal industry performance for January - December, 2017. *Ugol'*. 2018;3:58–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73>

9. Guttikunda SK, Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India. *Atmospheric Environment*. 2014;92:449–460. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057>

10. Tarazanov IG, Gubanov DA. Russia's coal industry performance for January - December, 2020. *Ugol'*. 2021;3:27–43. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-3-27-43> (In Russ.)

11. Yanovskii AB. Main trends and prospects of the coal industry development in Russia. *Ugol'*. 2017;8:10–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-10-14>

12. Tarazanov IG, Gubanov DA. Russia's coal industry performance for January - December, 2019. *Ugol'*. 2020;3:54–69. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-3-54-69> (In Russ.)

13. Glinina OI. The Coal Industry in Russia: 295 years history and new opportunities. *Ugol'*. 2017;10:4–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-10-4-10>

14. Afanaseva OV, Mingaleeva GR, Dobronravov AD, Shamsutdinov EV. Complex use of ash and slag waste. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(7-8):26–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-7-8-26-36>

15. Ryabov YuV, Delitsyn LM, Ezhova NN, Sudareva SV. Methods for beneficiation of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and ways for their commercial use (a review). *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019;3:3–24.

<https://doi.org/10.1134/S0040363619030056>

16. Golik VI, Dmitrak YuV, Kachurin NM, Stas GV. Parameters of ash drain activation as a binder when making a concrete. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019; 330(8):173–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2223>

17. Bowman SD. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR). In: *Background and Application: guidelines for investigating geologic hazards and preparing engineering geology reports, with a suggested approach to geologic hazard ordinances in Utah*. Utah: The University of Utah; 2016, p. 198–203.

18. Rashad AM. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles. *Journal of Cleaner Production*. 2015;87(1):717–725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.080>

19. Da Silva PR, De Brito J. Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler. *Advances in Concrete Construction*. 2013;1(1):65–84. <https://doi.org/10.12989/acc.2013.1.1.065>

20. Khagleev EP. Ash-slag dumps with annual regulation differentiated flows of ash and slag coal power station. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(7-8):21–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-7-8-21-32>

21. Koval TV, Abdulmenova AK. Use of heat station waste in the case of PJSC Irkutskenergo. *Molodezhnyj vestnik IrGTU*. 2020;10(1):126–130. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мехряков Антон Дмитриевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: mehryakov-ad@irkutskenergo.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton D. Mekhryakov,
Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: mehryakov-ad@irkutskenergo.ru



Кудряшов Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры теплоэнергетики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: kan@istu.irk.ru

Alexander N. Kudryashov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Heat Power
Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: kan@istu.irk.ru

Коваль Татьяна Валерьевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры теплоэнергетики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: kovaltv@istu.irk.ru

Tatiana V. Koval,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Heat Power Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: kovaltv@istu.edu

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 01.03.2021; одобрена после рецензирования 02.04.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Information about the article

The article was submitted 01.03.2021; approved after reviewing 02.04.2021; accepted for publication 29.04.2021.



Оценка влияния ветроэлектростанций на изменение суммарной инерции электроэнергетической системы

© И.А. Разживин, Н.Ю. Рубан, В.Е. Рудник, А.С. Гусев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Резюме: Цель – определить степень воздействия разной доли ветроэнергетических установок 4-го типа в общем объеме генерации на параметры асинхронного режима электроэнергетической системы. Воспроизведение процессов в электроэнергетической системе производится с помощью Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем, представляющего собой многопроцессорную программно-техническую систему. Разработана модель электроэнергетической системы, включающая помимо традиционных источников генерации ветроэлектростанцию, объединяющую в себе варьлируемое количество ветроэнергетических установок 4-го типа. В системе автоматического управления ветроэнергетической установки реализован контур управления (по активной мощности и напряжению) с дополнительным регулятором виртуальной инерции. По результатам анализа изменения параметров асинхронного режима при использовании алгоритма виртуальной инерции установлено, что время развития асинхронного режима по защищаемой линии сократилось максимально на 0,1 с. Однако время первого цикла асинхронного хода между двумя генераторами в послеаварийном режиме увеличилось в 2 раза: при мощности ветроэлектростанции 100 МВт время асинхронного хода составило 0,36 с (без алгоритма виртуальной инерции), и 0,74 с – с алгоритмом виртуальной инерции. Экспериментально подтверждено, что с ростом мощности ветроэлектростанции уменьшается время развития асинхронного режима и время, за которое традиционные генераторы выпадают из синхронизма. Последнее подтверждено фактом влияния работы ветроэнергетических установок 4-го типа в энергосистеме на суммарную инерцию: ее значение изменилось в интервале от 8,745 до 5,478 с. Исследование функционирования алгоритма виртуальной инерции подтвердило его воздействие на электромеханические переходные процессы в энергосистеме: наиболее благоприятный эффект замечен при значении виртуальной инерции равном 2 с и мощности ветроэлектростанции 100 МВт.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, инерция, силовой преобразователь, система автоматического управления, асинхронный ход

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант № МК-1675.2019.8.

Для цитирования: Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Рудник В.Е., Гусев А.С. Оценка влияния ветроэлектростанций на изменение суммарной инерции электроэнергетической системы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 220–234. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-220-234>

Evaluation of the effect of wind-operated power plants on the total inertia of an electric power system

Igor A. Razzhivin, Nikolay Yu. Ruban, Vladimir E. Rudnik, Alexander S. Gusev

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract: This paper is aimed at determining the effect of a variable number of Type 4 wind turbines in the total generation of the corresponding electric power system on the parameters of an asynchronous regime of such a system. Processes occurring in an electric power system were simulated using an all-mode real-time simulation complex of electric power systems constituting a multi-processor software and hardware system. A model of an electric power system was developed, which, in addition to conventional power sources, included a wind-operated power plant combining a variable number of Type 4 wind turbines. The automatic control system of the simulated wind-operated power plant comprised a control loop (in terms of active power and voltage) equipped with an additional regulator of virtual inertia. An analysis of changes in the parameters of the asynchronous regime using a virtual inertia algorithm showed that the time of its advancement along the protected line was reduced maximally by 0.1 s. However, the time of the first cycle of asynchronous motion between two generators in the post-emergency regime increased by 2 times. Thus, for a wind-operated plant with

a capacity of 100 MW, the time of asynchronous motion was 0.36 sec and 0.74 sec without using and when using a virtual inertia algorithm, respectively. It was experimentally confirmed that an increase in the power of a wind-operated power plant leads to a decrease in both the time of advancement of the asynchronous regime and the time, during which conventional generators transit from the synchronous regime. The latter was evidenced by the effect of Type 4 wind turbines on the value of total inertia, which ranged from 8.746 to 5.478 s. A study of the virtual inertia algorithm confirmed its impact on the electromechanical transient processes in power systems. The most favourable effect was noted at a virtual inertia value of 2 s and a wind-operated power plant capacity of 100 MW.

Keywords: wind turbine, inertia, power converter, automatic control system, out-of-step mode

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. MK-1675.2019.8.

For citation: Razzhivin IA, Ruban NYu, Rudnik VE, Gusev AS. Evaluation of the effect of wind-operated power plants on the total inertia of an electric power system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):220–234. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-220-234>

ВВЕДЕНИЕ

В мире наблюдается динамика внедрения новых мощностей за счет использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), преимущественно ветроэлектростанций (ВЭС). Согласно отчету¹ [1], суммарная генерируемая мощность ВЭС в мире за последние 10 лет увеличилась более чем в 3 раза и составляет 651 ГВт (5,9% от мирового производства электроэнергии). В ЕЭС России ВИЭ-генерация в наибольшем количестве присутствует в «Объединенном диспетчерском управлении энергосистемы Юга»², суммарная установленная мощность ВЭС и солнечных электростанций (СЭС) составляет порядка 640 МВт³ [2], и интеграция ВИЭ продолжается достаточно активно.

С увеличением доли ВИЭ увеличивается их влияние на электроэнергетические системы (ЭЭС), что создает определенные вызовы в управлении режимами, сохранении баланса мощности, устойчивости и надежности ЭЭС. Помимо прочего актуальной становится проблема снижения суммарной инерции в ЭЭС. Снижение суммарной инерции обусловлено наличием силового преобразователя напряжения в конструкциях современных ВИЭ (ветроэнергетических установок (ВЭУ) 3-го и 4-го типов, СЭС), в СЭС отсутствуют вращающиеся механизмы, а генера-

торы указанных ВЭУ, по сути, становятся «развязанными» с энергосистемой. Кроме того, инерция системы становится изменяющейся во времени из-за постоянной трансформации мощности, выдаваемой ВИЭ. В аварийных режимах в системах с меньшей инерцией скорость изменения частоты и других режимных параметров происходит быстрее [3, 4]. Анализ, проведенный в [5], показывает, что за период с 1996 по 2016 г. общее значение инерции в Европе снизилось на 20%. Системы с меньшей инерцией могут быстрее потерять свою устойчивость в случае серьезных аварий, асинхронный режим в таких системах может быть ошибочно принят за короткое замыкание. Таким образом, масштабная интеграция ВИЭ снижает инерционные свойства ЭЭС и создает проблемы с обеспечением ее устойчивости. При этом действующие системы противоаварийной автоматики (ПА), например автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР), могут быть нечувствительны к быстро происходящим изменениям в ЭЭС.

Поскольку среди различных типов ВИЭ наибольшая динамика внедрения принадлежит ВЭУ, для постановки задачи проведем их краткий обзор. ВЭУ реализуют множество разнообразных концепций относительно их устройства, типа генератора, подсоединения

¹Renewables 2020 Global Status Report [Электронный ресурс]. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf (24.10.2020).

²ОДУ Юга [Электронный ресурс]. URL: <https://so-ups.ru/odu-south/> (25.10.2020).

³Обзоры «ЕЭС России: промежуточные итоги» и «Анализ показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России» за 2019 год [Электронный ресурс]. URL: https://so-ups.ru/index.php?id=ups_review19 (27.10.2020).



к сети, системы управления, а также особенностей функционирования. Согласно положениям IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) и международному стандарту⁴ [6, 7], принято классифицировать ВЭУ следующим образом: на базе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (1 тип); на базе асинхронной машины с фазным ротором (2 тип); на базе асинхронной машины двойного питания (doublyfed induction generator) (3 тип); на базе синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов (в основном многополюсные генераторы, без редуктора в механической части) (4 тип). Схемы ВЭУ 1 и 2 типа, так называемые установки с постоянной скоростью вращения, являются устаревшими конструкциями, применяемыми с начала 80-х годов. Из недостатков таких конструкций следует отметить, что такие ВЭУ потребляют реактивную мощность, соответственно, требуют установки дополнительных конденсаторных батарей. ВЭУ 1 и 2-го типа имеют сниженный КПД для скоростей ветра, отличных от номинальной скорости, высокое механическое напряжение и передают колебания скорости ветра в электрическую сеть. В силу низкого КПД (по сравнению с 3 и 4 типами) ВЭУ 1 и 2 типа все меньше встречаются на рынке (не применяются в современных проектах ВЭС) и активно заменяются на действующих ВЭС. За последнее десятилетие ВЭУ с регулируемой скоростью (3 и 4-й тип) стали самыми распространенными среди применяемых и продаваемых ВЭУ [8]. Эти турбины позволяют достигать оптимальной выходной мощности в широком диапазоне скоростей ветра путем настройки частоты вращения при изменении входной скорости ветра, генераторы таких ВЭУ подсоединены к сети с помощью преобразователей напряжения. Это позволяет снизить связанность частоты сети и частоты генератора, и, следовательно, осуществить регулирование скорости [9].

Согласно анализу, минимальный вклад в суммарную инерцию ЭЭС вносят ВЭУ 4 типа, в связи с чем дальнейшие эксперименталь-

ные исследования проведем на примере их моделирования в ЭЭС. В работах [10–12] представлены теоретические аспекты и направления решения проблемы снижения инерции ЭЭС посредством модернизации системы автоматического управления (САУ) силовых преобразователей ВЭУ, в частности для решения задач участия ВЭС в регулировании частоты и мощности ЭЭС. Для этого, например, производителями ВЭУ были разработаны устройства контроля виртуальной инерции GE WindINERTIA [13], ENERCON Inertia Emulation [14].

Однако не исследованным остается вопрос вклада работы устройств контроля виртуальной инерции на сохранение устойчивости ЭЭС, функционирование ПА, например АЛАР. В соответствии с этим, целью данной статьи является оценка работы САУ виртуальной инерцией ВЭУ 4 типа (с синхронным генератором и возбуждением от постоянных магнитов, подключаемой к ЭЭС через силовой преобразователь напряжения) на изменение параметров асинхронного режима.

РЕГУЛЯТОР ВИРТУАЛЬНОЙ ИНЕРЦИИ

В электроэнергетике принято оценивать инерцию по величине T_j – постоянной инерции агрегата:

$$T_j = \frac{E}{S} = \frac{J_\Sigma \omega^2}{S}, \quad (1)$$

где J_Σ – суммарная инерция агрегата; E – кинетическая энергия; S – номинальная полная мощность агрегата.

А общую инерцию ЭЭС $T_{j\text{ЭЭС}}$ рассчитывают согласно формуле:

$$T_{j\text{ЭЭС}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ji} S_i}{S_{\text{ЭЭС}}}, \quad (2)$$

где T_{ji} и S_i – постоянная инерции и номинальная полная мощность i -го генератора; n – общее количество синхронных генераторов,

⁴ГОСТ Р 54418.27.1-2019 (МЭК 61400-27-1:2015). Установки ветроэнергетические. Часть 27-1. Общие имитационные модели ветроэнергетических установок, присоединенных к энергосистеме. М.: Стандартинформ, 2020.

подключенных к сети; $S_{\text{ЭЭС}}$ – полная мощность энергосистемы, которая равна сумме номинальных мощностей работающих агрегатов.

Наряду с традиционными крупными синхронными генераторами ВЭУ обладают значительным количеством кинетической энергии вращающихся масс:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2, \quad (3)$$

где J – инерция ветроколеса; ω – угловая частота вращения ветроколеса.

Однако в случае ВЭУ 4 типа эта энергия не оказывает влияние на общую инерцию ЭЭС, поскольку механическая часть отделена от энергосистемы силовым преобразователем.

Согласно (2), интеграция современных ВЭУ в ЭЭС фактически увеличивает общую установленную мощность $S_{\text{ЭЭС}}$, однако постоянная инерции остается прежней, что негативно сказывается на частотной характеристике системы, поскольку динамика изменения частоты в ЭЭС зависит от общего значения инерции $T_{j\text{ЭЭС}}$ [15]:

$$\frac{T_{j\text{ЭЭС}}}{f_0} \frac{df}{dt} = P_{\text{МЭХ}_\Sigma} - P_{\text{ЭЛ}_\Sigma} = \Delta P_{\text{ЭЭС}}, \quad (4)$$

где f_0 – установленная частота ЭЭС; f – текущая частота ЭЭС; $P_{\text{МЭХ}_\Sigma}$, $P_{\text{ЭЛ}_\Sigma}$ – полные механическая и электромагнитная мощности агрегатов ЭЭС, $\Delta P_{\text{ЭЭС}}$ – приращение небаланса мощности ЭЭС при собственной частоте f .

Частота ЭЭС f неразрывно связана со скоростью вращения ротора всех синхронных машин ЭЭС и является электромеханической переменной, которую необходимо постоянно и точно контролировать с помощью соответствующих устройств автоматики. Изменение активной мощности ΔP в любом районе ЭЭС способствует изменению частоты Δf .

Традиционная САУ силового преобразователя ВЭУ обеспечивает работу в точке максимальной мощности ВЭУ (от англ. maximum power point tracking – MPPT), формируя соответствующую уставку механического момента или мощности, контролирует уровень зарядки конденсаторной батареи и напряжение в цепи постоянного тока, управление реактивной мощностью, осуществляет контроль выдаваемой активной мощности и трехфазного напряжения в узле подключения, обеспечивая синхронизацию с ЭЭС [16].

Стратегия регулятора виртуальной инерции основана на логике использования кинетической энергии вращающейся массы ВЭУ (рис. 1).

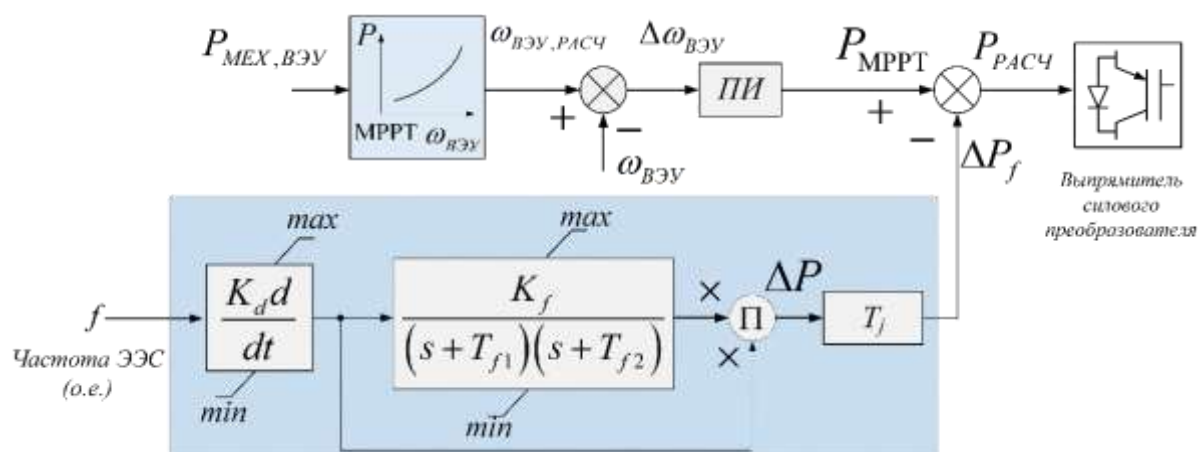


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления maximum power point tracking с регулятором виртуальной инерции: T_{f1} , T_{f2} , K_d , K_f – постоянные времени и коэффициенты регулятора, T_{jB} – виртуальная инерция

Fig. 1. Block diagram of the maximum power point tracking automatic control system with a virtual inertia controller: T_{f1} , T_{f2} , K_d , K_f – time constants and controller coefficients of the controller, T_{jB} – virtual inertia

САУ контролирует выходную электрическую мощность ВЭУ в зависимости от изменения частоты. Расчетная активная мощность, формируемая регулятором виртуальной инерции ΔP_f , рассчитывается из выражения [17]:

$$\Delta P_f = T_{jB} f \frac{df}{dt}. \quad (5)$$

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

В качестве платформы для моделирования режимов работы и анализа влияния ВЭС на устойчивость ЭЭС, а также анализа функ-

ционирования регулятора виртуальной инерции на изменение ее режимных параметров была разработана модель ЭЭС, однолинейная схема которой представлена на рис. 2.

Модель ЭЭС реализована во Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС). ВМК РВ ЭЭС представляет собой многопроцессорную программно-техническую систему реального времени гибридного типа, объединяющую в себе совокупность специализированных гибридных процессоров (СГП) всего значимого оборудования моделируемой ЭЭС [18, 19]. Модель ЭЭС содержит один источник бесконечной мощности, линии

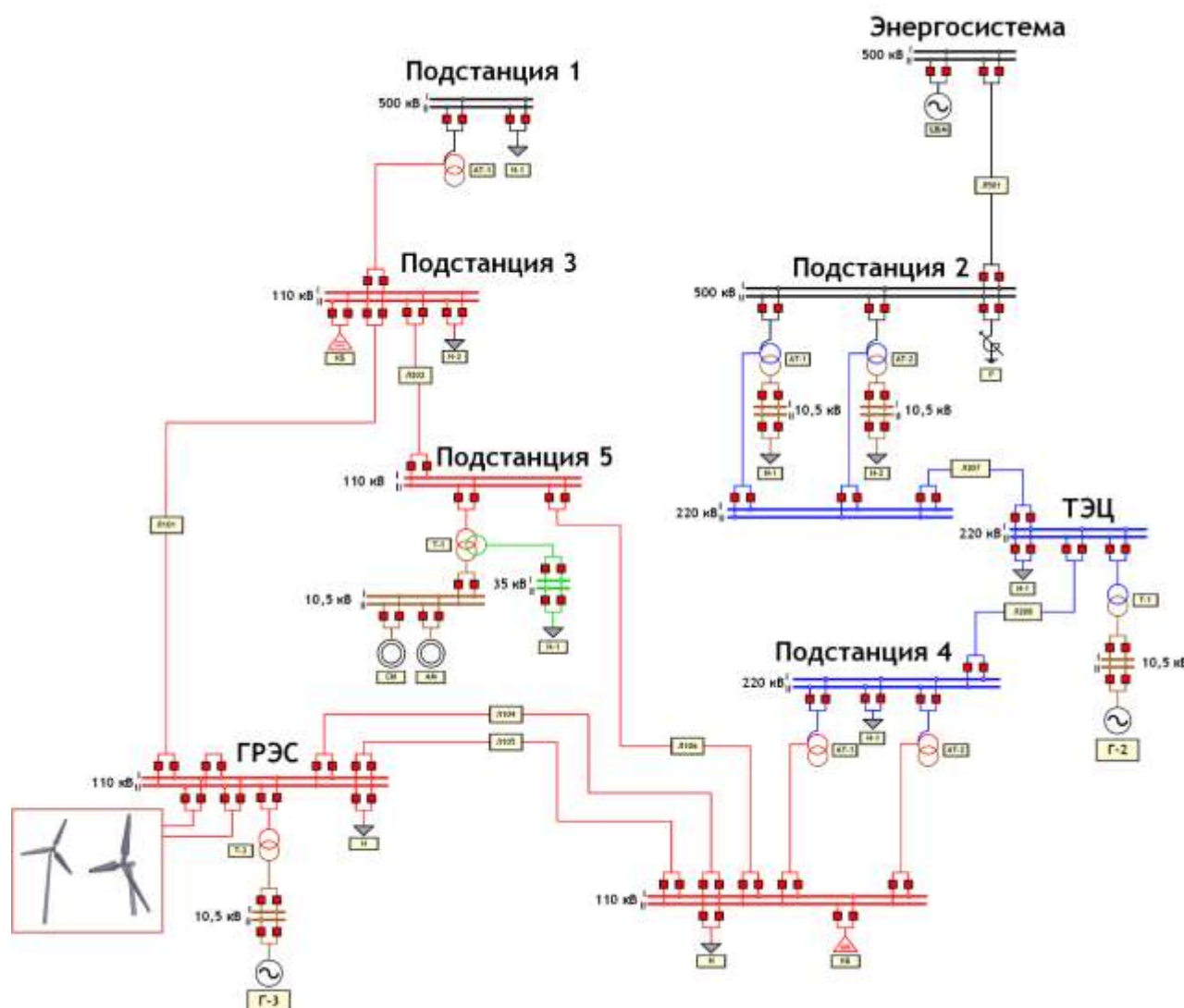


Рис. 2. Фрагмент экспериментальной электроэнергетической системы
Fig. 2. Fragment of an experimental electric power system

электропередачи напряжением 500, 220 и 110 кВ, трансформаторы, компенсирующие устройства, статические и динамические нагрузки (синхронный и асинхронный двигатели), турбогенератор Г2 номинальной мощностью 225 МВ·А). В качестве ВЭС принят эквивалент ВЭУ 4 типа, СГП которой был ранее разработан и всережимно верифицирован авторами [20]. В качестве упрощения скорость ветра принята постоянной, механическая часть ВЭУ представлена двухмассной моделью. В САУ силового преобразователя со стороны выпрямления реализован контур управления по активной мощности и напряжению, с дополнительным регулятором виртуальной инерции, со стороны инвертора – контуры управления напряжением цепи постоянного тока, реактивной мощностью и напряжением в узле присоединения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыт № 1: Оценка влияния ВЭС на асинхронный режим.

Для оценки влияния работы ВЭС на устойчивость исследуемой ЭЭС произведено моделирование аварийной ситуации: трехфазное короткое замыкание (КЗ) в момент времени $t = 0,2$ с на линии № 207 с последующим ее отключением, приводящим к разрыву связи ЭЭС с балансирующим узлом, нарушению устойчивости и возникновению асинхронного режима. Опыты проводились при замещении мощности традиционного источника Г3 мощностью, вырабатываемой ВЭС в различных соотношениях, при этом суммарная мощность ЭЭС не изменялась: $P_{ВЭС} = 20$ МВт (11% от мощности Г3), $P_{ВЭС} = 60$ МВт (33% от мощности Г3), $P_{ВЭС} = 100$ МВт (55% от мощности Г3), $P_{ВЭС} = 162$ МВт (90% от мощности Г3). Согласно (2), изменение $T_{jэс}$ суммарной инерции ЭЭС при замещении традиционной генерации имеет представленные в табл. 1 значения.

В исследуемом аварийном режиме после отключения линии № 207 турбогенераторы

Г2 и Г3 оказываются электрически связаны через линию № 208, группу АТ на Подстанции 4 и линии Л104 и Л105. Предположим, что на отходящей от ТЭЦ линии № 208 установлено устройство АЛАР, измеряющее угол между напряжениями по концам линии, т.е. со стороны ТЭЦ и в конце контролируемой зоны (в нашем случае на противоположном конце линии) на шинах 220 кВ Подстанции 4. На рис. 3 представлены осциллограммы взаимного угла между напряжениями по концам линии № 208.

Таблица 1. Значение суммарной инерции электроэнергетической системы при интеграции ветроэлектростанций

Table 1. Value of electric power system total inertia under integration of wind farms

Уровень мощности ветроэлектростанций, МВт	$T_{jэс}$, с	ΔT_j , с
0	8,745	–
20	8,341	0,404
60	7,535	1,210
100	6,728	2,017
162	5,478	3,267

В послеаварийном режиме, в момент отключения линии № 207 $t = 0,5$ с, наблюдается процесс асинхронного хода, векторы напряжений по концам линии Л208 разворачиваются друг относительно друга и контролируемый угол δ пересекает $\pm 180^\circ$. Проворот угла δ в положительном направлении соответствует повышению частоты и избытку мощности в части ЭЭС, присоединенной к дальнему концу контролируемой линии. Асинхронный ход свидетельствует также о том, что электрический центр качаний расположен на контролируемой линии⁵.

В процессе развития асинхронного режима скорость увеличения разности углов стремительно нарастает с увеличением доли мощности ВЭС в ЭЭС, в частности с момента отключения линии № 207. Сводные данные приведены в табл. 2.

⁵АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.020.008-2015. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Автоматика ликвидации асинхронного режима. Нормы и требования. Введ. 24.12.2015. М., 2015.

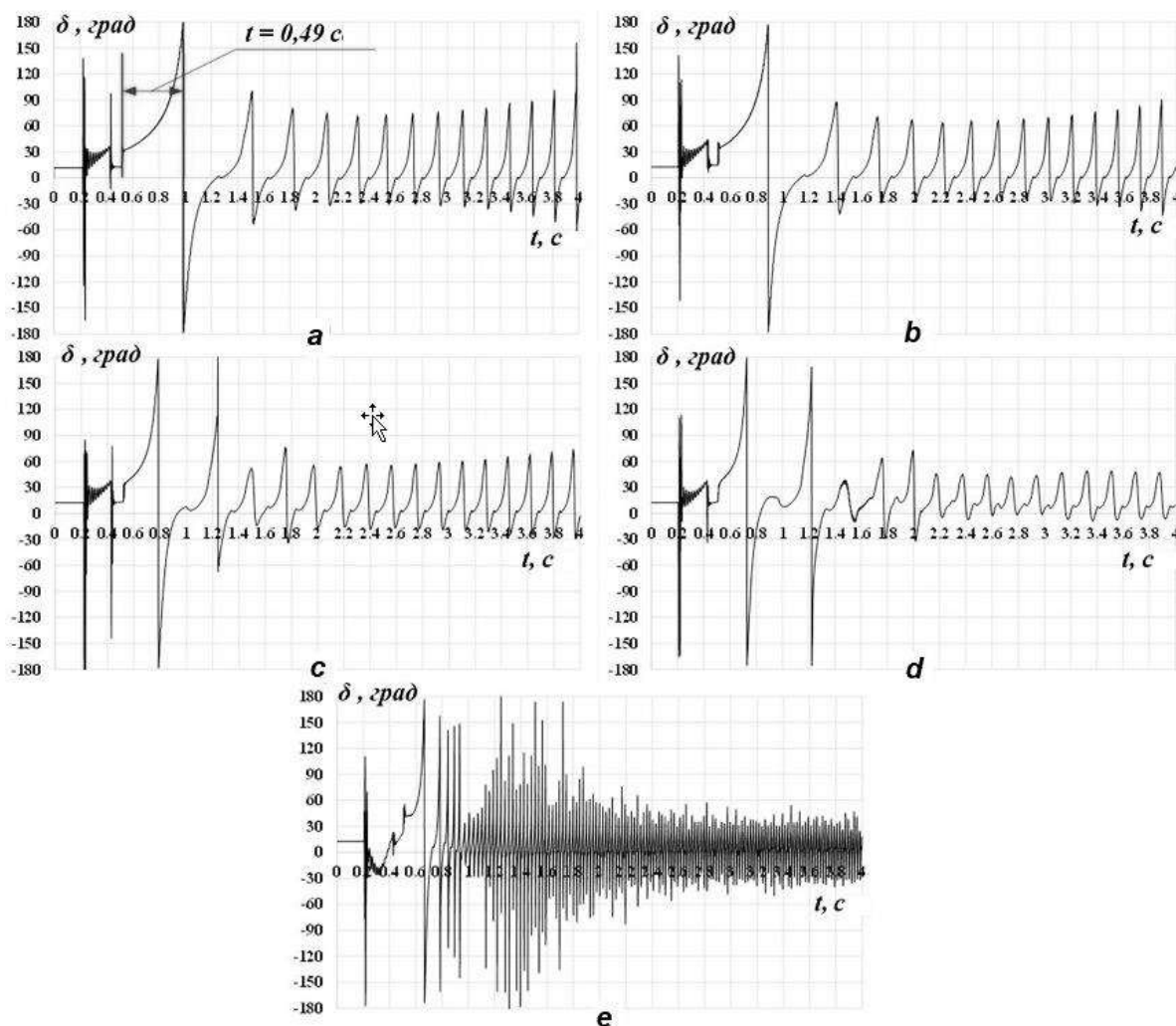


Рис. 3. Осциллограммы взаимного угла напряжений по концам линии № 208:
a – без ветроэлектростанции; b – мощность ветроэлектростанции 20 МВт; c – мощность ветроэлектростанции 60 МВт; d – мощность ветроэлектростанции 100 МВт; e – мощность ветроэлектростанции 162 МВт
Fig. 3. Waveforms of the mutual voltage angle at the ends of the line no. 208: a – without a wind farm; b – 20 MW wind farm; c – 60 MW wind farm; d – 100 MW wind farm; e – 162 MW wind farm

При развитии асинхронного режима в ЭЭС с классической генерацией изменение угла δ происходит медленнее в силу инерционности электромеханических процессов, однако замещение традиционных генераторов ВЭС, снижающих инерционность ЭЭС, значительно ускоряет процесс.

На рис. 4 представлены осциллограммы угла δ (между ЭДС) турбогенераторов Г2, Г3 и ШБМ и относительного угла δ_{23} , характеризующего работу Г2 и Г3 в послеаварийном режиме, когда они остаются изолированы от ШБМ.

При мощности ВЭС 0 и 20 МВт, соответственно, наблюдается проворот угла δ Г3 один раз, т.е. в дальнейшем Г3 возвращается к устойчивой работе. В целом наблюдается схожая ситуация, когда, например, изменение угла δ Г3 в послеаварийном режиме в ЭЭС с преобладающей классической генерацией происходит медленнее в силу инерционности, однако при замещении мощности Г3 мощностью ВЭС процессы ускоряются. В частности нарушение синхронной работы Г3 при интеграции ВЭС происходит быстрее, также быстрее изменяется и относительный

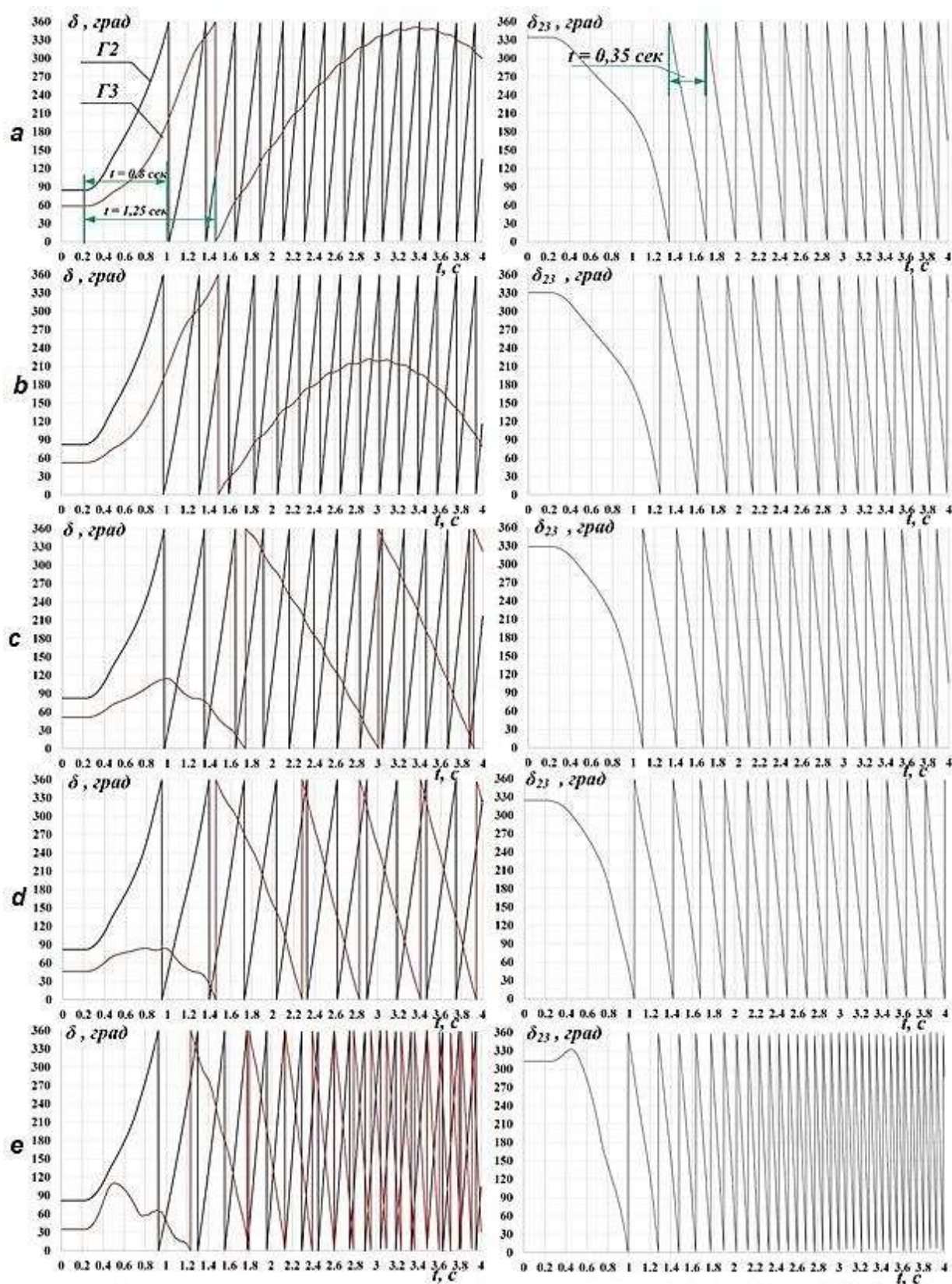


Рис. 4. Осциллограммы угла δ турбогенераторов Г2 и Г3 относительно шин бесконечной мощности и угла δ_{23} относительно друг друга: а – без ветроэлектростанции; б – мощность ветроэлектростанции 20 МВт; в – мощность ветроэлектростанции 60 МВт; д – мощность ветроэлектростанции 100 МВт; е – мощность ветроэлектростанции 162 МВт

Fig. 4. Waveforms of δ angle of G2 and G3 turbine generators relative to infinite buses and δ_{23} angle relative to each other: а – without a wind farm; б – 20 MW wind farm; в – 60 MW wind farm; д – 100 MW wind farm; е – 162 MW wind farm



Таблица 2. Время развития асинхронного режима электроэнергетической системы при интеграции ветроэлектростанции

Table 2. Development time of electric power system out-of-step mode under integration of wind farms

Уровень мощности ветроэлектростанции, МВт	Время развития асинхронного режима, с
0	0,49
20	0,39
60	0,29
100	0,23
162	0,19

угол δ_{23} , что заметно по циклам асинхронных качаний в ЭЭС.

Сводные данные по времени, за которое происходит нарушение устойчивой работы Г3 и времени первого цикла асинхронного хода между Г2 и Г3, в послеаварийном режиме приведены в табл. 3.

Ускорение процессов может привести к неправильной работе как самого устройства АЛАР, так и защиты АЛАР от избыточных срабатываний при изменении угла δ защищаемого объекта, не связанного с развитием асинхронного режима, поскольку основным признаком отличия процесса развития асинхронного режима от аварийных и коммутационных процессов является увеличение режимного параметра на текущем интервале измерения не более чем в два раза по отношению к его изменению на предыдущих интервалах измерения [18].

Устройство АЛАР должно выявлять и ликвидировать асинхронные режимы с длительностью цикла асинхронного режима от $t = 0,2$ до 10 с^5 . Опыты показывают, что ускорение процессов, в частности развитие асинхронного режима и изменение взаимного угла между напряжениями по концам линии № 208 происходит достаточно быстро, что может

явиться причиной неправильной работы устройства.

Опыт № 2: Влияние алгоритма виртуальной инерции на асинхронный режим.

Для оценки влияния функционирования алгоритма виртуальной инерции на скорость развития асинхронного режима проведены аналогичные эксперименты, опыт трехфазного КЗ с функционированием алгоритма введения виртуальной инерции. Алгоритм был реализован экспериментально со значениями $T_{jB} = 2 \text{ с}$, $T_{jB} = 3,2 \text{ с}$ для режимов с долей генерации ВЭС 60, 100 и 162 МВт, имеющих наибольшее влияние на асинхронный ход.

Осциллограммы взаимного угла напряжений по линии № Л208, угла δ турбогенераторов Г2 и Г3 относительно шин бесконечной мощности и угла δ_{23} относительно друг друга приведены на рис. 5–7.

Сводные данные по времени проворота векторов напряжений по концам линии № Л208 и времени, за которое происходит нарушение устойчивой работы Г2 и Г3, времени первого цикла асинхронного хода между Г2 и Г3 в послеаварийном режиме приведены в табл. 4

Время развития асинхронного режима по линии № Л208 при использовании алгоритма виртуальной инерции оказывает обратный эффект, т.е. время, за которое происходит нарушение устойчивости по линии, сокращается. Однако стоит заметить что функционирование алгоритма способствует увеличению времени нарушения устойчивой работы Г3 в случаях, когда мощность ВЭС составляет 60 и 100 МВт, Наиболее благоприятный эффект наблюдается при использовании алгоритма виртуальной инерции у ВЭС мощностью 100 МВт, время первого цикла асинхронного хода увеличивается в 2 раза.

Таблица 3. Нарушение устойчивой работы Г3 и времени первого цикла асинхронного хода

Table 3. Failure of G3 stable operation and time of the out-of-step mode first cycle

Уровень мощности ветроэлектростанции, МВт	Время нарушения устойчивой работы Г2, с	Время нарушения устойчивой работы Г3, с	Время первого цикла асинхронного хода, с
0	0,80	1,25	0,37
20	0,78	1,32	0,37
60	0,78	1,52	0,31
100	0,78	1,29	0,36
162	0,72	1,03	0,29

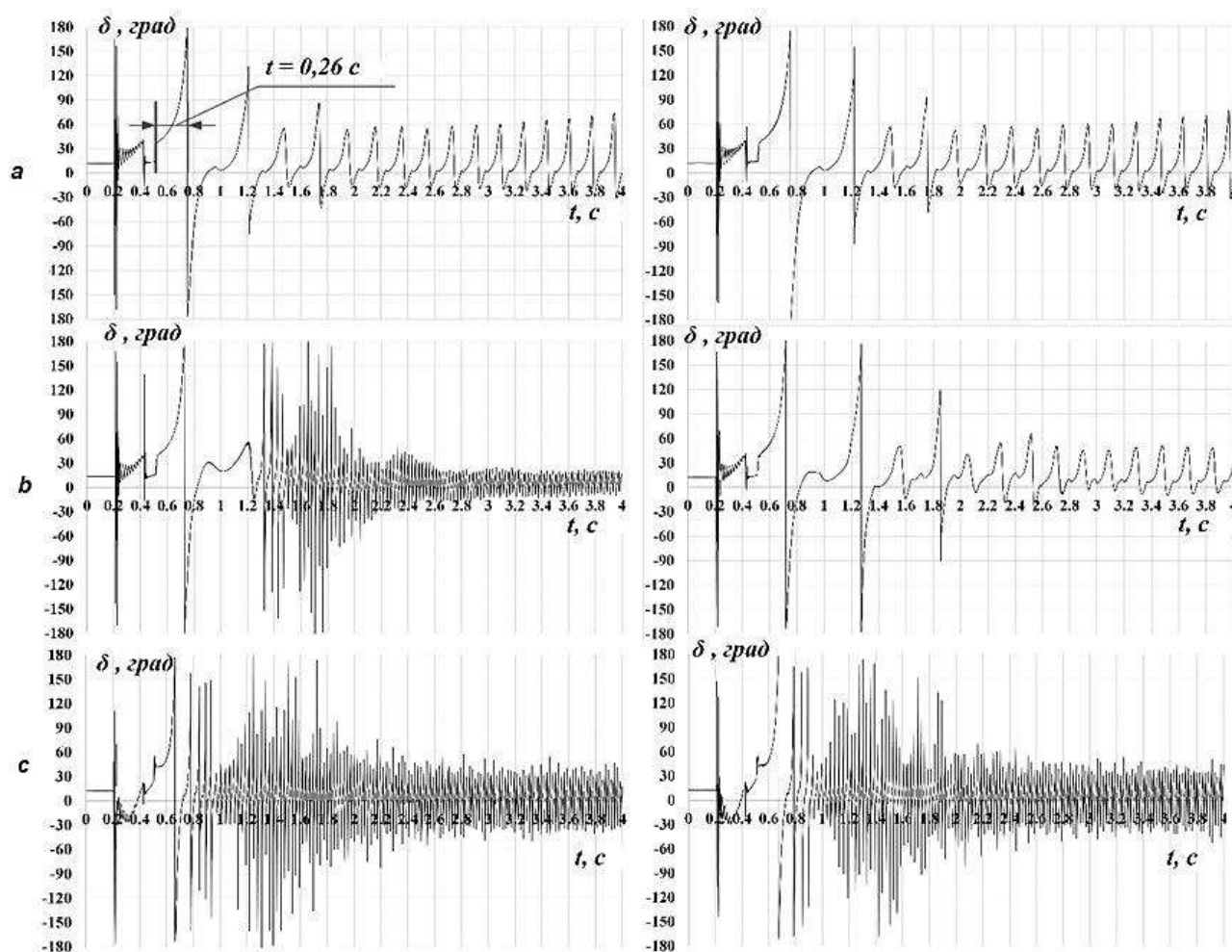


Рис. 5. Осциллограммы взаимного угла напряжений по линии № 208:

а – мощность ветроэлектростанции 60 МВт, $T_{jB} = 2$ с, $T_{jB} = 3,2$ с; б – мощность ветроэлектростанции 100 МВт, $T_{jB} = 2$ с, $T_{jB} = 3,2$ с; в – мощность ветроэлектростанции 162 МВт $T_{jB} = 2$ с, $T_{jB} = 3,2$ с

Fig. 5. Waveforms of the mutual voltage angle along the line no. 208:

а – 60 MW wind farm, $T_{jB} = 2$ s, $T_{jB} = 3.2$ s; б – 100 MW wind farm, $T_{jB} = 2$ s, $T_{jB} = 3.2$ s;

в – 162 MW wind farm $T_{jB} = 2$ s, $T_{jB} = 3.2$ s

Таблица 4. Сводная таблица результатов опытов № 1 и 2

Table 4. Summary table of the results of experiments no. 1 and 2

Уровень мощности ветроэлектростанции, МВт	Время развития асинхронного режима по линии № Л208, с			Время нарушения устойчивой работы Г2, с			Время нарушения устойчивой работы Г3, с			Время первого цикла асинхронного хода, с		
	$T_{jB} = 0$ с	$T_{jB} = 2$ с	$T_{jB} = 3,2$ с	$T_{jB} = 0$ с	$T_{jB} = 2$ с	$T_{jB} = 3,2$ с	$T_{jB} = 0$ с	$T_{jB} = 2$ с	$T_{jB} = 3,2$ с	$T_{jB} = 0$ с	$T_{jB} = 2$ с	$T_{jB} = 3,2$ с
60	0,29	0,26	0,26	0,78	0,73	0,73	1,52	1,65	1,7	0,31	0,33	0,34
100	0,23	0,26	0,26	0,78	0,73	0,73	1,29	1,31	1,58	0,36	0,74	0,34
162	0,19	0,19	0,19	0,72	0,73	0,92	1,03	1,03	0,75	0,29	0,29	0,30

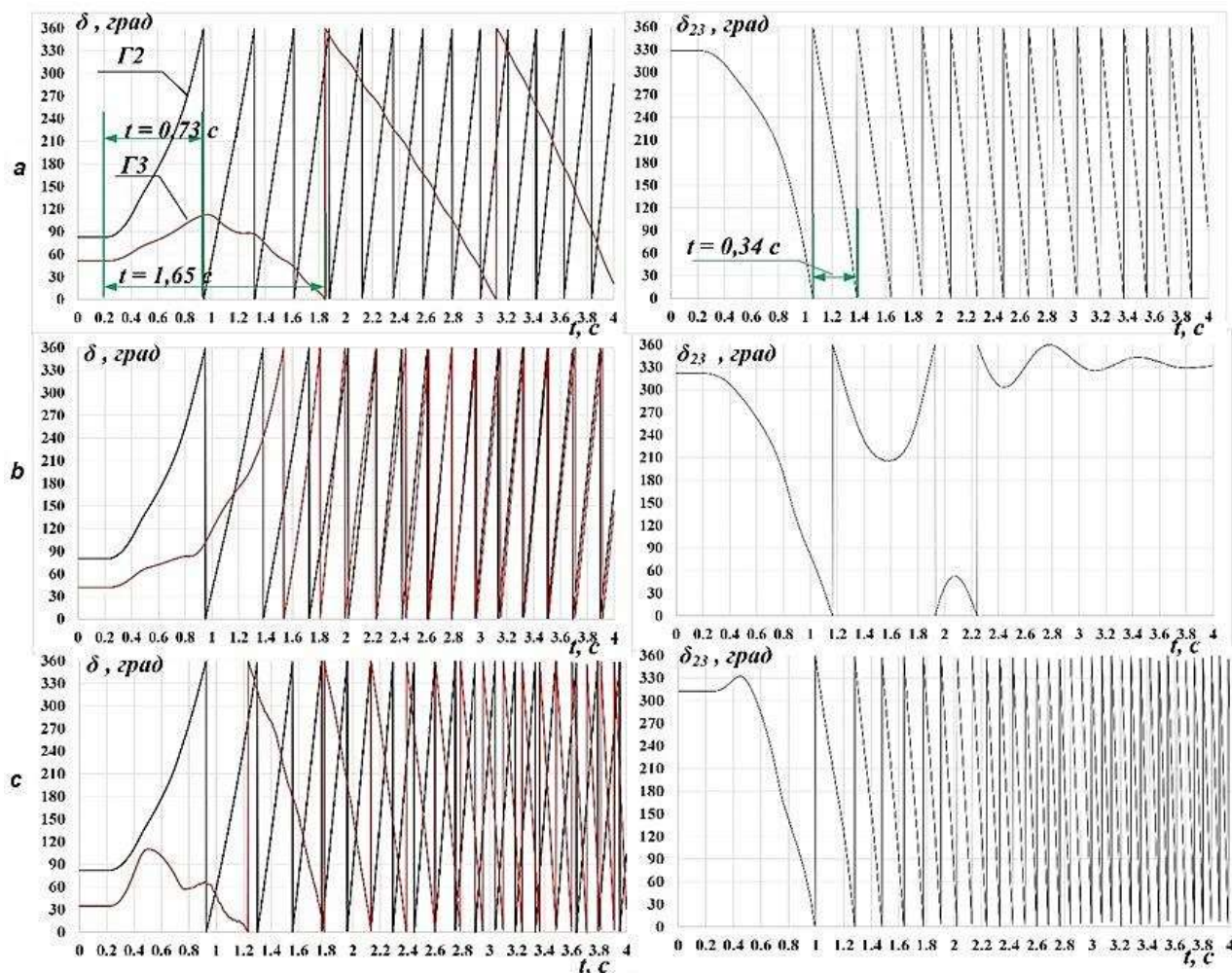


Рис. 6. Осциллограммы угла δ турбогенераторов Г2 и Г3 относительно шин бесконечной мощности и угла δ_{23} относительно друг друга при $T_{JB} = 2$ с: а – мощность ветроэлектростанции 60 МВт; б – мощность ветроэлектростанции 100 МВт; в – мощность ветроэлектростанций 162 МВт
Fig. 6. Waveforms of δ angle of G2 and G3 turbine generators relative to infinity buses and δ_{23} angle relative to each other at $T_{JB} = 2$ s: a – 60 MW wind farm; b – 100 MW wind farm; c – 162 MW wind farm

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в данной работе эксперименты показали, что при интеграции большого числа ВЭУ 4 типа в ЭЭС параметры асинхронного режима изменяются:

1. С ростом мощности ВЭС, образованной указанными ВЭУ, уменьшается время развития асинхронного режима и время, за которое традиционные генераторы выпадают из синхронизма, что подтверждает факт влияния ВЭС на суммарную инерцию в ЭЭС и скорость протекания процессов.

2. При достаточно высокой доле мощности ВЭС в ЭЭС равной 90% (162 МВт) наблюдаются сильные колебания, система становится неустойчивой. Это обусловлено работой систем автоматического управления

преобразователями ВЭУ и работой автоматик традиционных генераторов.

Также в работе произведена попытка анализа применения виртуальной инерции на изменение параметров асинхронного режима. Относительно этого можно заключить следующее:

1. Функционирование алгоритма виртуальной инерции преобразователей ВЭУ оказывает влияние на электромеханические переходные процессы в ЭЭС.

2. Исследование положительного влияния алгоритма виртуальной инерции требует более глубокого анализа, поскольку результаты моделирования показали неоднозначное влияние на параметры асинхронного режима, в частности наиболее благоприятный эф-

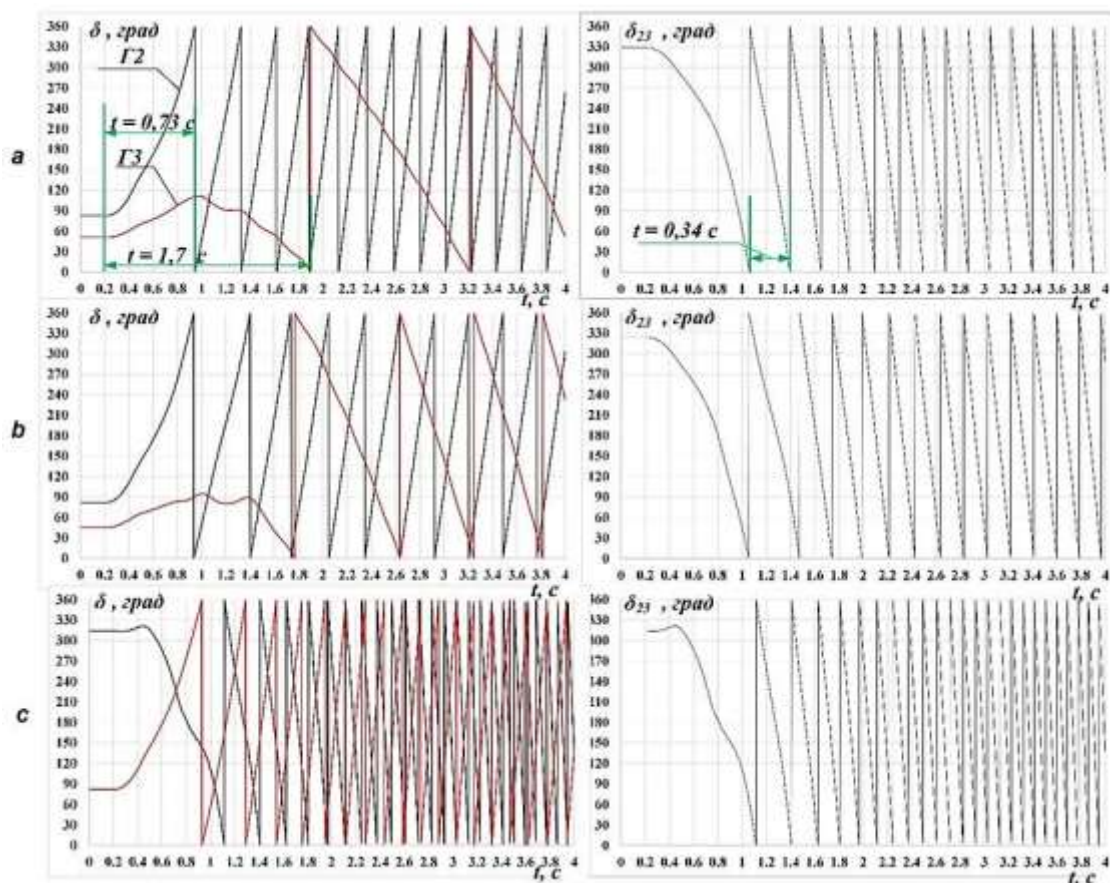


Рис. 7. Осциллограммы угла δ турбогенераторов Г2 и Г3 относительно шин бесконечной мощности и угла δ_{23} относительно друг друга при $T_{JB} = 3,2$ с: а – мощность ветроэлектростанции 60 МВт; б – мощность ветроэлектростанции 100 МВт; в – мощность ветроэлектростанции 162 МВт
 Fig. 7. Waveforms of δ angle of G2 and G3 turbine generators relative to infinity buses and δ_{23} angle relative to each other at $T_{JB} = 3.2$ s: a – 60 MW wind farm; b – 100 MW wind farm; c – 162 MW wind farm

фekt замечен при мощности ВЭС 100 МВт и значении $T_{JB} = 2$ с, что говорит о возможном положительном влиянии на работу таких устройств как АЛАР.

Следовательно, заключить, что применение алгоритма виртуальной инерции способствует улучшению динамических свойств ЭЭС с ВЭС, приближая их к сетям с традиционной генерацией, нельзя, поскольку заметна изменчивость осциллограмм взаим-

ных углов генераторов и углов напряжений по концам линии № 208 в зависимости от мощности ВЭС, что свидетельствует о необходимости глубокого анализа с целью установления закономерности влияния алгоритма виртуальной инерции на параметры асинхронного режима при различных мощностях ВЭС в ЭЭС, а также различных мест установки ВЭС в ЭЭС, видов нарушения устойчивости и т.д.

Список литературы

1. Герасимов А.С., Есипович А.Х., Смирнов А.Н. Об опыте верификации цифровых и физических моделей энергосистем // Электрические станции. 2010. № 11. С. 14–19.
2. Akhmatov V., Nielsen A.H., Pedersen J.K., Nymann O. Variable-speed wind turbines with multi-pole synchronous permanent magnet generators. Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools // Wind Engineering. 2003. Vol. 27. Iss. 6. P. 531–548.
3. Erlich I., Wilch M. Primary frequency control by wind turbines // 3rd IEEE PES ISGT Europe (Berlin, 14–17 October 2012). Berlin: IEEE, 2012. P. 2–17.
4. Gautam D., Goel L., Ayyanar R., Vittal V., Harbour T. Control strategy to mitigate the impact of reduced inertia due to doubly fed induction generators on large power systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Vol. 26. Iss. 1. P. 214–224.



<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051690>

5. Fernández-Guillamón A., Gómez-Lázaro E., Muljadi E., Molina-García Á. Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
6. Ellis A., Kazachkov Y., Muljadi E., Pourbeik P., Sanchez-Gasca J.J. Description and technical specifications for generic WTG models – A status report // *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*. 2011. <https://doi.org/10.1109/PSCE.2011.5772473>
7. Agrawal R., Bharradwaj S.K., Kothari D.P. An Educational and professional simulation tools in power systems and FACTS controllers – «An Overview» // *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. 2013. Vol. 2. Iss. 2. P. 91–96.
8. Ackermann T. Wind power in power systems. 2nd ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2012. 1049 p. <https://doi.org/10.1002/0470012684>
9. Стычинский З.А., Воропай Н.И. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. Магдебург: MAFO, 2010. 223 с.
10. Morren J., De Haan S.W.H., Kling W.L., Ferreira J.A. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006. Vol. 21. Iss. 1. P. 433–434. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.861956>
11. Muljadi E., Yin Cheng Zhang, Gevorgian V., Kosterev D. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant // *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (Milwaukee, 18–22 September 2016)*. Milwaukee: IEEE, 2016. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855542>
12. Clark K., Miller N.W., Sanchez-Gasca J.J. Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies. New York, 2010. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/267218696_Modeling_of_GE_Wind_Turbine-Generators_for_Grid_Studies_Prepared_by. (25.09.2020).
13. Wachtel S., Beekmann A. Contribution of wind energy converters with inertia emulation to frequency control and

frequency stability in power systems // 8 International Conference Workshop on large-scale integration of wind Power into Power systems as well as on transmission networks for offshore wind farms (Bremen, 14–15 October 2009). Bremen, 2009. P. 460–465.

14. Gonzalez-Longatt F. Impact of emulated inertia from wind power on under-frequency protection schemes of future power systems // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016. Vol. 4. P. 211–218.
15. Michalke G., Hansen A.D., Hartkopf T. Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator [Электронный ресурс]. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.6144&rep=rep1&type=pdf> (25.09.2020).
16. Negnevitsky M., Voropai N., Kurbatsky V., Tomin N., Panasetsky D. Development of an intelligent system for preventing large-scale emergencies in systems // *Power and Energy Society General Meeting (Vancouver, 21–25 July 2013)*. Vancouver: IEEE, 2013. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672099>
17. Гусев А.С., Хрущев Ю.В., Гурий С.В., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем // *Электричество*. 2009. № 12. С. 5–8.
18. Andreev M.V., Gusev A.S., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Askarov A., et al. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019. Vol. 34. Iss. 2. P. 1404–1415. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2876668>
19. Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Аскаров А.Б., Уфа Р.А. Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 183–194. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-183-194>
20. Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Суворов А.А., Уфа Р.А., Аскаров А.Б., Рудник В.Е. [и др.]. Разработка физической модели статического преобразователя напряжения ВЭУ 4 типа в рамках гибридного подхода // *Интеллектуальная электротехника*. 2020. № 1. С. 85–97. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2020_1_85

References

1. Gerasimov AS, Esipovich AH, Smirnov AN. Experience of verification of digital and physical models of electric power systems. *Elektricheskie stancii = Electrical stations*. 2010;11:14–19. (In Russ.)
2. Akhmatov V, Nielsen AH, Pedersen JK, Nymann O. Variable-speed wind turbines with multi-pole synchronous permanent magnet generators. Part I: Modelling in dynamic simulation tools. *Wind Engineering*. 2003;27(6):531–548. <https://doi.org/10.1260/030952403773617490>
3. Erlich I, Wilch M. Primary frequency control by wind turbines. In: *3rd IEEE PES ISGT Europe*. 14–17 October 2012, Berlin. Berlin: IEEE; 2012, p. 2–17.
4. Gautam D, Goel L, Ayyanar R, Vittal V, Harbour T.

Control strategy to mitigate the impact of reduced inertia due to doubly fed induction generators on large power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2011;26(1):214–224.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051690>

5. Fernández-Guillamón A., Gómez-Lázaro E., Muljadi E., Molina-García Á. Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
6. Ellis A, Kazachkov Y, Muljadi E, Pourbeik P, Sanchez-Gasca JJ. Description and technical specifications for generic WTG models – A status report. In: *IEEE/PES*

- Power Systems Conference and Exposition. 2011. <https://doi.org/10.1109/PSCE.2011.5772473>
7. Agrawal R, Bharradwaj SK, Kothari DP. An Educational and professional simulation tools in power systems and FACTS controllers – “An Overview”. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. 2013;2(2):91–96.
8. Ackermann T. Wind power in power systems. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2012, 1049 p. <https://doi.org/10.1002/0470012684>
9. Stychinsky ZA, Voropay NI. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economy*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; 2010, 223 p.
10. Morren J, De Haan SWH, Kling WL, Ferreira JA. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006;21(1):433–434. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.861956>
11. Muljadi E, Yin Cheng Zhang, Gevorgian V, Kosterev D. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant. In: *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 18–22 September 2016, Milwaukee. Milwaukee: IEEE; 2016, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855542>
12. Clark K, Miller NW, Sanchez-Gasca JJ. Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies. New York; 2010. Available from: https://www.researchgate.net/publication/267218696_Modeling_of_GE_Wind_Turbine-Generators_for_Grid_Studies_Prepared_by. [Accessed 25th September 2020].
13. Wachtel S, Beekmann A. Contribution of wind energy converters with inertia emulation to frequency control and frequency stability in power systems. In: *8 International Conference Workshop on large-scale integration of wind Power into Power systems as well as on transmission networks for offshore wind farms*. 14–15 October 2009, Bremen. Bremen; 2009, p. 460–465.
14. Gonzalez-Longatt F. Impact of emulated inertia from wind power on under-frequency protection schemes of future power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016;4:211–218.
15. Michalke G, Hansen AD, Hartkopf T. Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator. Available from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.6144&rep=rep1&type=pdf> [Accessed 25th September 2020].
16. Negnevitsky M, Voropai N, Kurbatsky V, Tomin N, Panasetsky D. Development of an intelligent system for preventing large-scale emergencies in systems. In: *Power and Energy Society General Meeting*. 21–25 July 2013, Vancouver. Vancouver: IEEE; 2013, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672099>
17. Gusev AS, Hrushchev YuV, Gurin SV, Svechkarev SV, Plodistyj IL. Electric power system real time all-mode modeling complex. *Elektrichestvo = Electricity*. 2009;12:5–8. (In Russ.)
18. Andreev MV, Gusev AS, Ruban N, Suvorov A, Ufa R, Askarov A, et al. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(2):1404–1415. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2876668>
19. Razzhivin IA, Ruban NYu, Askarov AB, Ufa RA. Development of hardware and software simulation tools for 4 type wind turbine modeling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(1):183–194. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-183-194>
20. Razzhivin IA, Ruban NYu, Suvorov AA, Ufa RA, Askarov AB, Rudnik VE, et al. Development of physical model of type 4 wind turbine static voltage converter within hybrid approach. *Intellektual'naya elektrotehnika*. 2020;1:85–97. (In Russ.) https://doi.org/10.46960/2658-6754_2020_1_85

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Разживин Игорь Андреевич,
кандидат технических наук, старший преподаватель
Отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
✉ e-mail: lionrash@tpu.ru

Рубан Николай Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент Отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: rubanny@tpu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor A. Razzhivin,
Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department
of Power Industry and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
✉ e-mail: lionrash@tpu.ru

Nikolay Yu. Ruban,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Power Industry and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: rubanny@tpu.ru



Рудник Владимир Евгеньевич,
аспирант,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: fordlp006@mail.ru

Vladimir E. Rudnik,
Postgraduate Student,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: fordlp006@mail.ru

Гусев Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроэнергетических систем,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: gusev_as@tpu.ru

Alexander S. Gusev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Electric Power Systems,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: gusev_as@tpu.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 23.12.2020; одобрена после рецензирования 24.02.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Information about the article

The article was submitted 23.12.2020; approved after reviewing 24.02.2021; accepted for publication 29.04.2021.

On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 3. Electric field distribution on the electrodes

Evgeniy S. Gorlanov*, Andrey A. Polyakov**

*EXPERT-AL LLC, St. Petersburg, Russia

**Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract: The aim of this work is to identify the theoretical limitations of molten salts electrolysis using solid electrodes to overcome these limitations in practice. We applied the theory of electric field distribution on the electrodes in aqueous solutions to predict the distribution of current density and potential on the polycrystalline surface of electrodes in molten salts. By combining the theoretical background of the current density distribution with the basic laws of potential formation on the surface of the electrodes, we determined and validated the sequence of numerical studies of electrolytic processes in the pole gap. The application of the method allowed the characteristics of the current concentration edge effect at the periphery of smooth electrodes and the distribution of current density and potential on the heterogeneous electrode surface to be determined. The functional relationship and development of the electrolysis parameters on the smooth and rough surfaces of electrodes were established by the different scenario simulations of their interaction. It was shown that it is possible to reduce the nonuniformity of the current and potential distribution on the initially rough surface of electrodes with an increase in the cathode polarisation, alumina concentration optimisation and melt circulation. It is, nonetheless, evident that with prolonged electrolysis, physical and chemical inhomogeneity can develop, nullifying all attempts to stabilise the process. We theoretically established a relationship between the edge effect and roughness and the distribution of the current density and potential on solid electrodes, which can act as a primary and generalising reason for their increased consumption, passivation and electrolytic process destabilisation in standard and low-melting electrolytes. This functional relationship can form a basis for developing the methods of flattening the electric field distribution over the anodes and cathodes area and, therefore, stabilising the electrolytic process. Literature overview, laboratory tests and theoretical calculations allowed the organising principle of a stable electrolytic process to be formulated – the combined application of elliptical electrodes and the electrochemical micro-borating of the cathodes. Practical verification of this assumption is one direction for further theoretical and laboratory research.

Keywords: electrolysis, solid electrodes, physical imperfection, cathode passivation, inert anodes, wettable cathodes

For citation: Gorlanov ES, Polyakov AA. On solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis. Part 3. Electric field distribution on electrodes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):235–251. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-235-251>

УДК 620.181.4: 666.3-135

К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 3. Распределение электрического поля на электродах

© Е.С. Горланов*, А.А. Поляков**

*ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ», г. Санкт-Петербург, Россия

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

Резюме: Цель – выявление теоретических ограничений электролиза расплавленных солей с применением твердых электродов для их преодоления на практике. Приложение теории распределения электрического поля на электродах в водных растворах к прогнозированию распределения плотности тока и потенциала на поликристаллической поверхности электродов в расплавленных солях. Сопрежением теоретических основ распределения плотности тока с тривиальными законами формирования потенциала на поверхности электродов получены основания и определена последовательность численных исследований процессов электролиза в междуполусном зазоре. Применение метода позволило установить особенности краевого эффекта концентрации тока на периферии гладких электродов и распределения плотности тока и потенциала на неоднородной поверхности

электродов. Моделированием различных сценариев взаимодействия параметров электролиза установлена их функциональная связь и проявление на гладкой и шероховатой поверхности электродов. Показано, что с увеличением поляризации катода, оптимизацией концентрации глинозема и циркуляции расплава можно снизить неоднородное распределение тока и потенциала на поверхности электродов с исходной шероховатостью. При этом очевидно, что при длительном электролизе могут развиваться физическая и химическая неоднородности, что аннулирует все попытки стабилизировать процесс. Теоретически установленная взаимосвязь краевого эффекта и шероховатости с распределением плотности тока и потенциала на твердых электродах может выступать первичной и обобщающей причиной их повышенного расхода, пассивации и дестабилизации электролиза в стандартных и легкоплавких электролитах. И в то же время эта функциональная связь может служить основой для разработки способов выравнивания распределения электрического поля по площади анодов и катодов и, следовательно, стабилизации электролитического процесса. Литературный обзор, лабораторная практика и теоретические расчеты позволили сформулировать принцип организации стабильного электролитического процесса – комплексное применение электродов эллиптической формы и электрохимическое микроборирование катодов. Практическое подтверждение этого предположения – одно из возможных направлений последующих теоретических и лабораторных исследований.

Ключевые слова: электролиз, твердые электроды, физическая неоднородность, пассивация катода, инертные аноды, смачиваемые катоды

Для цитирования: Горланов Е.С., Поляков А.А. К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 3. Распределение электрического поля на электродах. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 235–251. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-235-251>

INTRODUCTION

Potential distribution and, to an even greater extent, current distribution are of great importance for the technical applications in electrochemistry. The uneven current distribution leads to an uneven thickness distribution of the deposited coating. Fig. 1 shows the cross-section of copper sediment on the metallic substrate (see). The thickness of the Cu coating increases from the recess uphill the pick and reaches the maximum on the crest of a serrated profile. Moreover, a large build-up of deposited copper is observed at the corner joint of the inclined and horizontal surfaces. This indicates an increasing current density towards the asperity tip and on the outer edges during the electrolytic process.

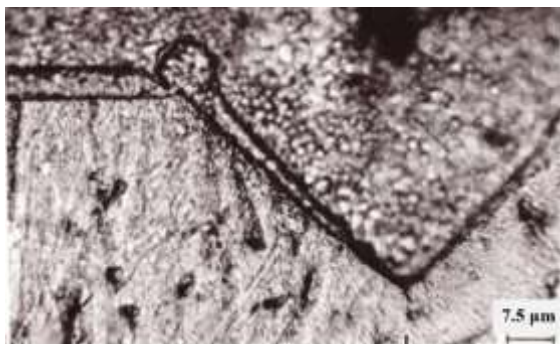


Fig. 1. Copper coating on a pinion profile [1]

Рис. 1. Медное покрытие на зубчатом профиле [1]



Fig. 2. Electrochemical local wear of the anodes along the edges around the perimeter

Рис. 2. Электрохимический локальный износ анодов по ребрам периметра

Similar phenomena occur on the anode. For example, during the electrolytic production of aluminium, the carbon anodes are consumed at a higher rate on the edges around the perimeter (fig. 2), resulting in the changes of actual integrated current density and interelectrode gap and increased electrode consumption. Similarly, for the inert anodes, the observed corrosion occurs more rapidly where current density localises.

In other words, without dwelling on the detail of the technological aspects, the electric field distribution theory is one of the fundamental principles of electrochemical engineering. Therefore, it is important to understand and predict the phenomena, which influence the current and potential distribution. The theory of these

processes on the electrodes in the aqueous solutions is extensively discussed in the books of J. Newman, N. Ibl, Y. Gamborg, A. Baraboshkin [2–5]. Since the electrochemical laws are valid for the electrolysis of the molten salts, we will attempt, to the extent necessary, to use this theory to calculate the electric field distribution on the cathode as applied to the electrolysis of cryolite-alumina melts. The current and potential distribution on the anode follows the same laws (considering the corresponding processes, their kinetic parameters and polarisation effects) and will not be analytically considered here.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE CALCULATIONS

The main factors influencing the electric field distribution in the electrode space are [2–5]:

- geometry and the hydrodynamic conditions of the system;
- electrical conductivity of electrolyte and electrodes;
- the profile characteristic and surface condition of electrodes;
- the degree of polarisation of the electrodes.

On the smooth or partially smooth surface of electrodes, for example, metallic one, the field and current density distribution is relatively uniform. However, there is a pronounced edge effect of current concentration at the edges, namely an increase in its density (fig. 3).

The same applies to structural elements (edges, rods, peaks and joints) of perforated or grooved cathodes and anodes (fig. 4). This is

associated with the increasing electrolyte cross-section between the anode and the cathode in the direction of the edge surfaces and, accordingly, the decreasing electrical resistance at a distance of the pole gap.

The electric field distribution is strongly affected by the state of the electrode surface, including chemical heterogeneity (heterogeneous composition, impurities) and physical heterogeneity (roughness), inherent in all polycrystalline products, including hot-pressed and cast ones. On this kind of surface, the local current densities at the peaks and recesses are different, even if the macroscopic current distribution in a given area is entirely uniform. Since the electrical conductivity of the electrode is higher than that of the electrolyte, the electric field near the interface is non-uniform. The equipotential surfaces reproduce the topography of the interface, and the current lines are perpendicular to this surface (fig. 5).

Therefore, the heterogeneity of the electric field leads to uneven current density distribution on the surface.

Integrating the mass and charge transport equation is the most general theoretical approach to solving the problem of current and potential distribution. The equation can rarely be solved with respect to the potential (or concentration) with all parameters considered. Therefore, the moderately simplified versions of this equation are used, resulting in the Laplace or Fick equations. The nature of the approximation depends on the type of the distribution (primary, secondary or tertiary).

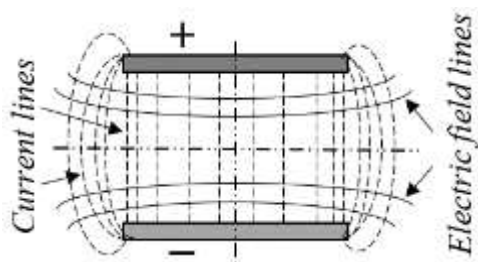


Fig. 3. Equipotential lines and current lines in the anode-cathode system
Рис. 3. Эквипотенциальные линии и линии тока в системе анод-катод

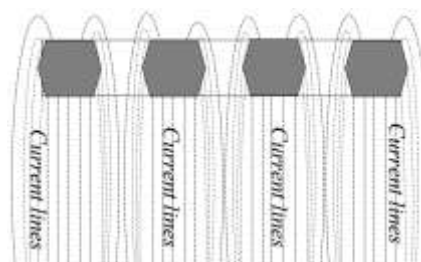


Fig. 4. Current lines on a perforated electrode
Рис. 4. Линии тока на перфорированном электроде

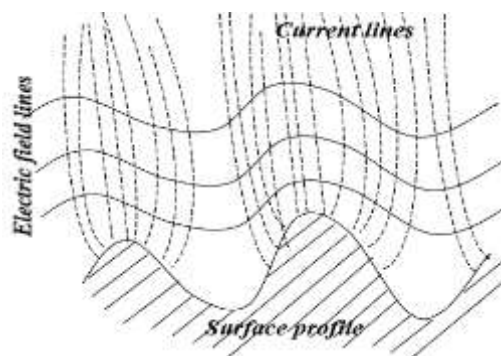


Fig. 5. Equipotential lines and current lines near the electrode
Рис. 5. Экипотенциальные линии и линии тока вблизи электрода

In the simplest case, one or both electrodes are non-polarisable, which corresponds to the **primary** field and current density distribution on this electrode. This distribution is the least uniform for the indicated geometry of the system. However, the surface of the melt next to the electrode is equipotential, and the current lines corresponding to the potential gradient are normal to the surface (see fig. 3–5).

If one considers the electrode polarisation – the charge transfer overpotential η_{trans} , then **the secondary** field and current distribution takes place. The absence of the diffusion overpotential means that there are no noticeable concentration gradients or other mass transfer limitations in the solution. The charge transfer overpotential at the low current density (the electrode potential is near the equilibrium value) is determined by the equation: $\eta_{trans} = i \cdot \beta_2$, where the polarisation at the secondary distribution β_2 is equal to [5]:

$$\beta_2 = \frac{R \cdot T}{n \cdot F \cdot i_0}, \quad (1)$$

where n is the number of electrons involved in the reaction; R is the gas constant, J/mol·K; T is the temperature of the process, K; F is the Faraday constant, J/mol; i_0 is the exchange current density, A/cm².

The exchange current is the rate of an electrochemical process in the forward and reverse directions at the equilibrium potential. As follows from equation (1), with increasing i_0 the polarisation and charge transfer overpotential decrease. If $i_0 \gg i$, the overpotential η_{trans} is close to zero, and the process is at equilibrium (reversible or

non-polarisable). Usually, the cathodic exchange current values in the molten salts are high – from one to hundreds of amperes per square centimetre (A/cm²) owing to the process acceleration at high temperatures. For the electrolysis of the cryolite-alumina melts i_0 is approximately 20 A/cm² [6, 7].

When the concentration field near the working electrode is considered, the corresponding solution to the problem results in **a tertiary** current distribution. Here, the metal deposition rate is determined by transport processes in the near-electrode diffusion layer. Tafel dependence between the current and the overpotential is introduced into the calculations to converge to the tertiary distribution: $\eta = a + b \lg i$, where the polarisation is approximately equivalent to the following value [4]:

$$\beta_3 = \frac{R \cdot T}{n F i_A}, \quad (2)$$

where i_A is the integrated or geometric current density.

For the smooth electrodes constituting the hypothetical infinitely long plate with a width of $2B$ ($-B < x < B$), the solution of the two-dimensional Laplace equation based on the conformal mapping method for **the primary potential distribution** reveals the dependence of local current density i_s on the coordinate x [4]:

$$i_s = i_A \left(1 - \frac{x^2}{B^2} \right)^{-1/2}. \quad (3)$$

According to equation (3), the current density i_s , increases from the middle of the electrode to

its periphery and tends to infinity at the edges. This owes to all the electric lines of force from an infinitely large area concentrated here $|x| > B$ (see Fig.).

For the secondary and tertiary current distribution on smooth electrodes, their polarisation $\beta_{2(3)}$, should be considered as well as the electrical resistance of the electrolyte ρ_{bath} in the pole gap l_x [4]:

$$i_S = i_A \cdot \exp \left[\frac{k \cdot x}{B \cdot \left(\frac{\beta_{2(3)}}{\rho_{bath} \cdot l_x} \right)} \right]. \quad (4)$$

In this equation, the coefficient k characterises the dependence of l_x on the coordinate x : $k = dl/dx$ or in the first approximation $k = d \ln l / dx$.

While discussing the electric field distribution on the **rough surface**, we will consider its profile described by the curve $x_S(y)$. The current distribution is set by the electric field between the electrode and the rough surface of the counter electrode with a sinuous profile with an amplitude less than the wavelength $A < L$ (fig. 6). The representation of the surface profile as a sine wave allows a variety of periodic shapes with different steps to be generated. In addition, the sine wave has no corner points, therefore the infinitely high current densities often observed at the corners are avoided.

In case of the constant polarisation β simultaneous solution of Laplace equation for the electrolyte and the cathodic surface profile $x_S = A \cdot \cos(2\pi/L)$ allows the local current density distribution to be calculated i_S [2, 4, 5]:

$$i_S = i_A \left[1 + \frac{\left(\frac{2\pi}{L} \right) (\rho_{bath} - \rho_{Al})}{\rho_{bath} + \rho_{Al} + \left(\frac{2\pi}{L} \right) \beta} \cdot A_S \cdot \cos \left(\frac{2\pi y}{L} \right) \right]. \quad (5)$$

In this equation, i_A is the integrated or geometric current density. This assumption is acceptable since we believe that the total current passes through the electrolyte cross-section in the pole gap with an electrical resistance ρ_{bath} , $\Omega \cdot \text{cm}$. We also consider the electrical resistance of liquid aluminium ρ_{Al} , $\Omega \cdot \text{cm}$; L is the sinuous wavelength or the elemental periodic physical defects, cm; A_S is the current roughness amplitude varying during the period L in the limits from $-A$ to $+A$, cm; y is the current coordinate on the « y » axis across the rough surface, cm.

The analysis of equation (5) shows that the value of polarisation β essentially affects the uniformity of current distribution over the initial or changing rough surface. The greater the polarisation of the surface of the electrode, the more uniform will be the current distribution on the electrode plane. Here it is important to address the term "polarisation". During the electrolysis, the current passes through the electrode and the potential deviates from the equilibrium values. A change in the electrode potential is called electrode polarisation and is expressed as the derivative of the overpotential on the current density: $\beta = d\eta/di$. This relation, i.e., polarisation, is technically the resistance per the square centimetre of the electrode area ($\Omega \cdot \text{cm}^2$). It can be determined as polarisation resistance R . If this resistance represents the slow charge transfer through the interface, it relates to the electrode kinetics and can be called charge transfer resistance R_{trans} . When R is associated with the slow ion transport through the near-electrode layer, it can be called the diffusion resistance of the potential-determining components R_D . Consequently, polarisation plays the role of a leveling additive in the electrolyte composition, widely used in electrometallurgy in aqueous media.

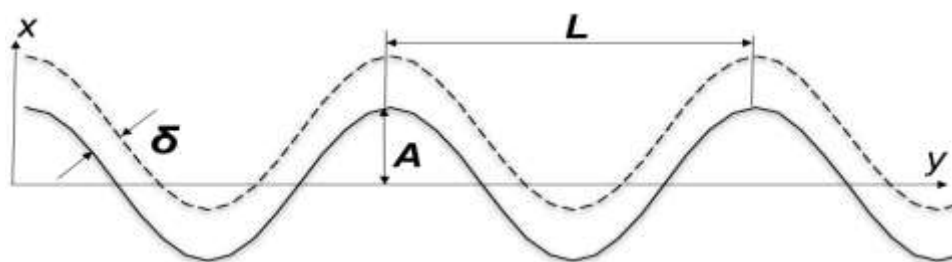


Fig. 6. Sinuous surface profile with a diffusion layer δ
Рис. 6. Синусоидальный профиль поверхности с диффузионным слоем δ

These additives precipitate on the roughness crests, increasing the local surface resistance. Thus, the current distribution levelling over the cathode is achieved. Therefore, the polarisation of any kind (kinetic, transport, crystallisation and other) could be beneficial to some extent for the stabilisation of electrode processes and electrolysis. It is limited by maximum current density.

However, what happens when the maximum current density i_p is achieved for aluminium? It is well known that without a change in the total current, the cathode potential shifts sharply to the electronegative side until the most electronegative impurities discharge. Their deficiency leads to the subsequent shift of the potential to the background decomposition values, i.e., electrolyte. However, the impurities discharge of and, what is more, the decomposition of aluminium or cryolite fluorides occur at higher cathodic polarisation, indicating the stable, gradual passivation process, i.e., the isolation of electrode. This unfavourable scenario can develop on the anode as well. However, in this case, the current density on the peaks and sharp edges of physical heterogeneity will lead to the fluorine ions discharge and the evolution of fluorocarbons on the carbon anode and of fluorine on the inert one (or to the electrochemical dissolution of the anode involving fluorine ions). In the first case, even with the stable electrolysis in the best-case scenario, an unfavourable environmental situation is created in the work area. In the other case, the chemical and electrochemical corrosion of the inert anode increases. These undesirable processes are highly probable when using polycrystalline or cast electrodes, anodes and cathodes, thus requiring practical and theoretical research. This study is the first attempt done in this direction.

The description of the potential distribution on a rough surface reduces to solving the Fick equation for concentration distribution of a substance in the diffusion layer. In the considerably diluted solutions, the diffusion equation can be represented as follows [2, 4, 5]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right). \quad (6)$$

Since we examine the kinetics of the pro-

cesses in the flat electrode system – the melt, the diffusion can be considered linear, as follows:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (7)$$

where x is the coordinate perpendicular to the electrode; the concentration gradient in the near-electrode layer of a certain thickness δ is constant (see fig. 6), i.e., the concentration changes linearly (Nernst assumption):

$$\frac{dc}{dx} = \text{const} = \frac{c_0 - c_s}{\delta}. \quad (8)$$

Then the electrolysis rate is equal to the diffusion transport rate or the diffusion current i_s [6]:

$$i_s = DnF \frac{dc}{dx} = nF \frac{D}{\delta} (C_0 - C_s), \quad (9)$$

where D is the diffusion coefficient, cm^2/s ; δ is the thickness of the diffusion layer, cm ; C_0 and C_s are the ion concentration in the melt volume and at the surface of the electrode, respectively, mol/cm^3 .

As the current density increases, C_s decreases, and the highest possible current at $C_s \rightarrow 0$ approaches the limiting diffusion i_{lim} :

$$i_l i_{lim} = nF \frac{D}{\delta} C_0. \quad (10)$$

The concentration of the potential-determining ions on the surface does not reach zero and can be determined by solving the equation (9) for C_s :

$$C_s = C_0 - \frac{i_s \delta}{nFD}. \quad (11)$$

The fractional expression on the right side of the equation (11) is the current ion concentration immediately at the sinuous surface (recess-peak). Hence, the cathode potential for the dilute solutions determined as:

$$E = E_p^0 + \frac{RT}{nF} \ln C_s \quad (12)$$

can be expressed as follows¹:

$$E = E_p^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(C_0 - \frac{i_s \delta}{nFD} \right), \quad (13)$$

where E_p^0 is the standard decomposition voltage (equilibrium potential) of the saturated solution of the potential-determining ions in the electrolyte using carbon (-1,180 V) or inert (-2,180 V) anode at 965°C. Electrode potential E is the decomposition voltage at the current concentration gradient of potential-determining ions in the diffusion layer δ . If in equation (13) the current is equal to zero $i_s = 0$, then the entire system and the potential are equilibrium at the given concentration C_0 :

$$E_p = E_p^0 + \frac{RT}{nF} \ln C_0. \quad (14)$$

Since in the actual system the same equilibrium potential establishes for all processes on the anode and cathode, the difference between the E and E_r potentials represents the concentration overpotential of the current process on a specific electrode, cathode η_{DC} or anode η_{DA} :

$$\eta_{DC(DA)} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i_s}{i_{lim}} \right). \quad (15)$$

Equation (13) can be used to calculate the potential distribution depending on the actual current density i_s and fixed values of the bulk concentration of the potential-determining ions C_0 , the transfer coefficient D and diffusion layer thickness δ . For the electrolysis of the molten salts, δ usually ranges from 0.1 to 1 mm [6]. Convective stirring and gas generation at the anode and gas-lifting in the melt, in particular, reduce this value by an order of magnitude. On a rough surface with a defect height of $H_{def} = 2A > \delta$, the diffusion layer follows the profile equally ac-

cessible for diffusion everywhere (see fig. 6).

Thus, the sequence of analytical calculations is as follows:

The calculation of current density distribution i_s on a given surface profile according to equations (3)–(5).

The following conditions can be simulated: the primary distribution, i.e., no polarisation when $\beta_1 = 0$, secondary β_2 , or tertiary β_3 distributions according to equations (1) and (2), respectively.

The potential distribution E is calculated based on the current values of the current density i_s on the surface according to equation (13).

CALCULATION RESULTS AND DISCUSSION

In the calculations, the standard characteristics of the NaF-AlF-Al₂O₃ melts at a temperature of 965°C were used. It is important to note that the calculation results are not absolute at the given parameters and in the approximation of smooth and sinuous profiles, but adequately reflect trends in the current density and potential distribution on the surface of electrodes. This provides a better understanding of the work of electrodes under near-real conditions. Therefore, the first model at $\beta_1 = 0$ assumes the absence of the charge transfer overpotential η_{trans} and the alumina concentration in the electrolyte close to saturation. The other model suggests the standard operation of the electrolytic cell under the diffusion kinetics at β_3 . Here we stress again that the next section presents the calculation results for the cathode surface only. Nevertheless, they characterise qualitatively the electric field distribution on the anode as well.

Smooth electrodes

The current density i_s and potential E are distributed relatively uniformly on the inner surface of smooth electrodes but increase sharply around the perimeter of the cathode (fig. 7).

¹It is worth noticing that for the anode process (in case of anodic dissolution of the electrode) in equation (9) the bulk and surface concentrations interchange their positions $i_s = DnF \frac{dc}{dx} = nF \frac{D}{\delta} (C_s - C_0)$; thus, the anode potential will be expressed by the following equation $E = E_p^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(C_0 + \frac{i_s \delta}{nFD} \right)$ / Заметим, что для анодного процесса (анодного растворения электрода) в уравнении (9) объемная и поверхностная концентрации поменяются местами $i_s = DnF \frac{dc}{dx} = nF \frac{D}{\delta} (C_s - C_0)$ и анодный потенциал будет выражаться уравнением: $E = E_p^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(C_0 + \frac{i_s \delta}{nFD} \right)$.

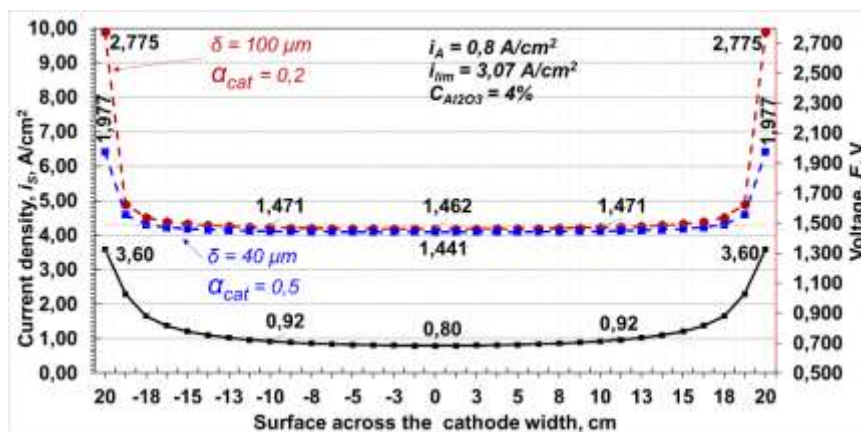


Fig. 7. Distribution of i_s (solid) and E (dashed) on smooth electrodes in the approximation of the primary distribution
Рис. 7. Распределение i_s (сплошная) и E (пунктирная) на гладких электродах в приближении первичного распределения

At β_1 with the weakly polarised electrodes, the current density (solid line) on edges and peripheral surface exceeds the geometrical current density on the inner surface by several times and reaches $1.50 \div 3.6 \text{ A/cm}^2$. The cathode potential (dashed lines) on the periphery can vary significantly depending on the conditions of the hydrodynamic stirring and the electroactive ions transfer. As the diffusion layer thickness δ increases and the transference number α_{cat} decreases approximately by two-fold, the potential increases from $1.6 \div 2.0 \text{ V}$ to $1.7 \div 2.8 \text{ V}$. For the cathode, this process acceleration leads to a transition from a local discharge of electronegative impurities, for example, calcium, to the passivation of peripheral regions by the electrolyte components. For the anode, the consequences of the edge effect involve the transition from the

oxygen ions discharge to that of fluorine and accelerated chemical and electrochemical consumption.

These negative effects are mitigated by the diffusion control of electrolysis with tertiary β_3 electric field distribution (fig. 8). With the same integrated current density of 0.8 A/cm^2 on the periphery, the current density increases by only two-fold. However, certain conditions can, to some extent, complicate the electrolysis process in the peripheral areas of the electrodes. For example, if the electrolyte viscosity increases or stirring conditions deteriorate and, hence, δ increases from 70 to 100 μm , the potential at the electrode edges can reach the level of impurity discharge at the cathode (see fig. 8) or selective dissolution of the anode components.

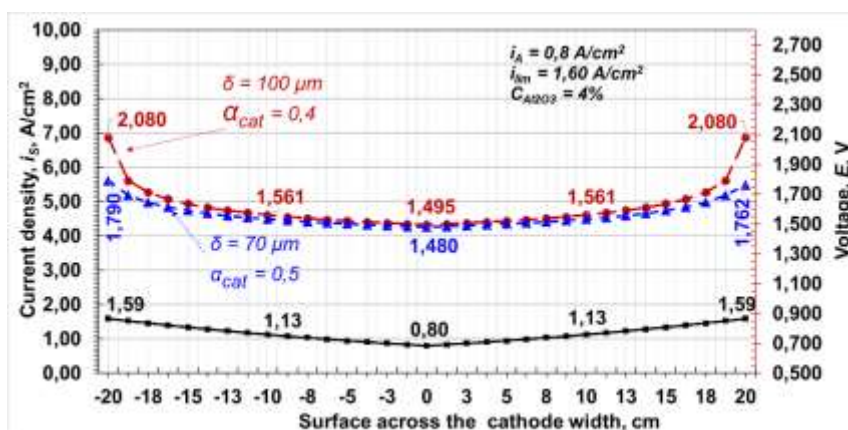


Fig. 8. Distribution of i_s (solid) and E (dashed) on smooth electrodes using the approximation of the primary distribution
Рис. 8. Распределение i_s (сплошная) и E (пунктирная) на гладких электродах в приближении третичного распределения

The addressed particularities of the edge effect on solid electrodes are fully applicable to the perforated and grooved cathodes and anodes. The current and potential concentration on the edges, side surfaces of the openings and rods increases the cathode passivation or the anode consumption proportional to their total area.

Rough electrodes

Firstly, we compared the operating modes of a polycrystalline cathode without significant polarisation and under the diffusion control of cathode processes. The figure below shows the current density and potential distribution for a given cathode surface profile $x_s = A \cos(2\pi/L)$ under the indicated parameters (fig. 9). Under the diffusion control, β_3 , the current density distribution (solid lines) and the corresponding potential distribution (dashed lines) are within the limits that satisfy the stable aluminium reduction on a solid carbon cathode.

The distribution heterogeneity, the current density and potential values sharply increase without activation and diffusion overpotentials (sine wave β_1 on fig. 9). On the defect peaks, the actual current density is approximately 2 A/cm^2 , at which the cathode potential reaches and exceeds the ionic discharge values of calcium of $1.600 \div 1.890 \text{ V}$. The subsequent potential jumps up to the electrolyte components discharge occurs with the calcium deficit or its absence in the electrolyte.

The surface roughness of the solid electrodes significantly limits the electrolysis intensification. The slight increase in current density proportionally changes the potential distribution at fixed surface parameters. These changes manifest a pronounced tendency to shift the potential to the electronegative side with an increase in the current density at the electrode (fig. 10).

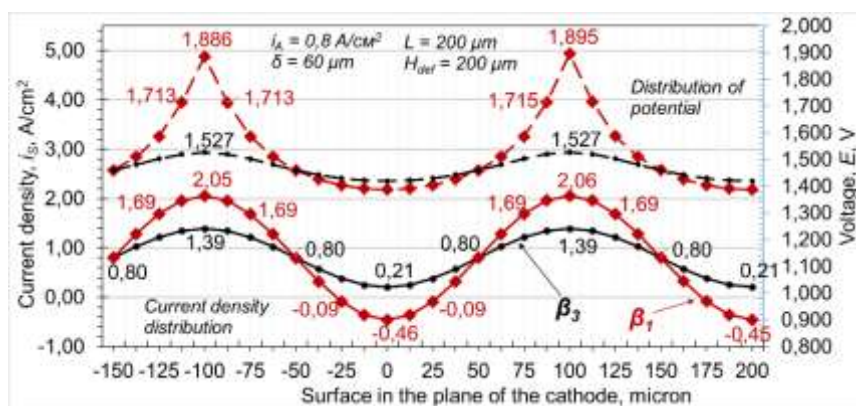


Fig. 9. Distribution of i_s (solid) and E (dashed) at β_1 and β_3
Рис. 9. Распределение i_s (сплошная) и E (пунктирная) при β_1 и β_3

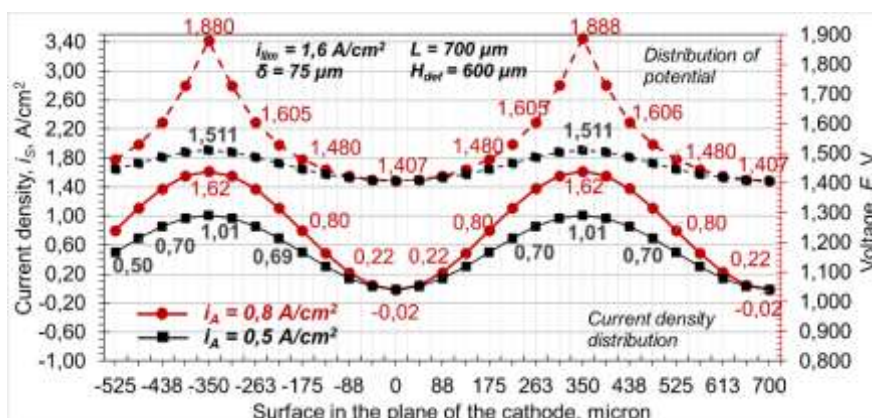


Fig. 10. Influence of the initial i_A value on the distribution of i_s (solid) and E (dashed)
Рис. 10. Влияние исходной i_A на распределение i_s (сплошная) и E (пунктирная)

We fitted the alumina concentration and the stirring conditions (0 and δ) to the parameters of the cathode roughness in a way that the increase in the integral current density i_A above 0.5 A/cm^2 led to an increase in the real current density i_S at the defect peaks to the values close to the limiting values i_{lim} . Under these conditions, a local potential jump creates conditions for the simultaneous discharge of the impurities that are more electronegative than aluminium.

Fig. 11 shows the calculation results simulating the diffusion limitations of the cathode process with an increase in the integrated current density.

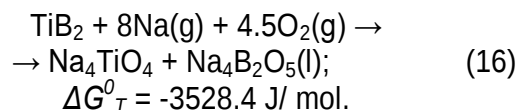
At the roughness up to $600 \text{ }\mu\text{m}$, the current density $i_A = 0.5 \text{ A/cm}^2$ and the intensive melt stirring ($\delta = 75 \text{ m}$), the cathode process approaches limiting density only at the alumina concentration of $2 \text{ wt.}\%$. However, at $i_A = 0.8 \text{ A/cm}^2$ electrolysis can be destabilised at the alumina concentration of $3 \text{ wt.}\%$. Increasing the integral current density up to 1 A/cm^2 on a polycrystalline surface allows a stable process only with alumina concentrations above $4 \text{ wt.}\%$. Indeed, the electrolysis conditions differ in highly soluble electrolytes (up to $10\text{--}15 \text{ wt.}\%$) and low-melting electrolytes with the saturation of $4\text{--}5.5 \text{ wt.}\%$ of Al_2O_3 . This difference is fundamental. In alumina-rich and particularly in suspended melts, the concentration component of polarisation is negligible. However, there is diffusion polarisation, which develops with an increase in the electrolyte viscosity and diffusion cathode layer thickness.

The alumina concentration c_0 and the diffusion layer thickness δ have the opposite effect on the maximum current density and cathode potential (equations (10) and (13)). When C_0 changes, δ changes, but not vice versa. In the standard melts, this one-way and indirect correlation through changes in the electrolyte viscosity becomes noticeable only in the hypereutectic region of the $\text{NaF}\text{--}\text{AlF}_3$ system and upon reaching the Al_2O_3 concentrations of $9\text{--}10 \text{ mol.}\%$ [6]. On the other hand, the influence of δ on the electrolysis kinetics is stronger and depends on the hydrodynamic conditions in the interelectrode gap. These conditions, including the diffusion layer thickness, can differ throughout the electrode area. Negative consequences for cur-

rent density distribution enhance with an increase in the electrolyte viscosity, a decrease of convective stirring, i.e., with an increase in the diffusion layer thickness δ (fig. 12).

The latter applies fully to the low-melting electrolytes of the $\text{KF}\text{--}\text{AlF}_3$ system with limited solubility of Al_2O_3 and especially to the melts suspended in alumina. Furthermore, in these systems with relatively high viscosity, the extremely low diffusion currents do not permit the electrolysis with the current density higher than 0.5 A/cm^2 on the metal electrodes [8–10] and a fortiori on the polycrystalline surfaces. In the literature, there is an opinion that the inert anodes should operate at current densities of approximately 1.2 A/cm^2 [11] to maintain the heat balance of the electrolysis cells.

With a relatively low increase in δ from 60 to 75 and $85 \text{ }\mu\text{m}$, the overall voltage will increase to the discharge potentials of the impurities that are more electronegative than aluminium, i.e., sodium and calcium (see fig. 12). If the latter can passivate the electrode after interaction with the cathode material, its impurities and electrolyte, then Na will pollute aluminium (carbon cathode) or interact, for example, with the TiB_2 cathode surface to form the borates:



The authors believe [12] that the products of this interaction can dissolve in the electrolyte, hence increasing the micro-defects and stimulating electrode corrosion.

In conclusion, we report the calculation results of the current density and potential distribution depending on the height of the physical defects (fig. 13).

In the range of the roughness height from 0.1 to 1 mm (simulating the heterogeneity development) the current density on the defect peaks reaches limiting values, and potential approaches possible decomposition of the electrolyte components and cathode passivation. As expected, this trend has more pronounced negative effects on the cathode processes. To a certain extent, one can control the electrolysis parameters discussed above (i_A , C_0 , β , δ) and

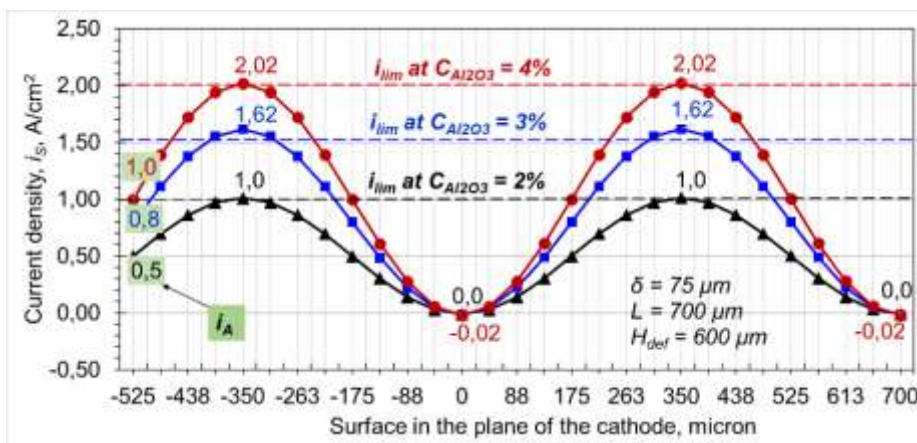


Fig. 11. Distribution of i_s at initial i_A of 0.5, 0.8 and 1.0 A/cm²
Рис. 11. Распределение i_s при исходной i_A равной 0.5, 0.8 и 1.0 A/cm²

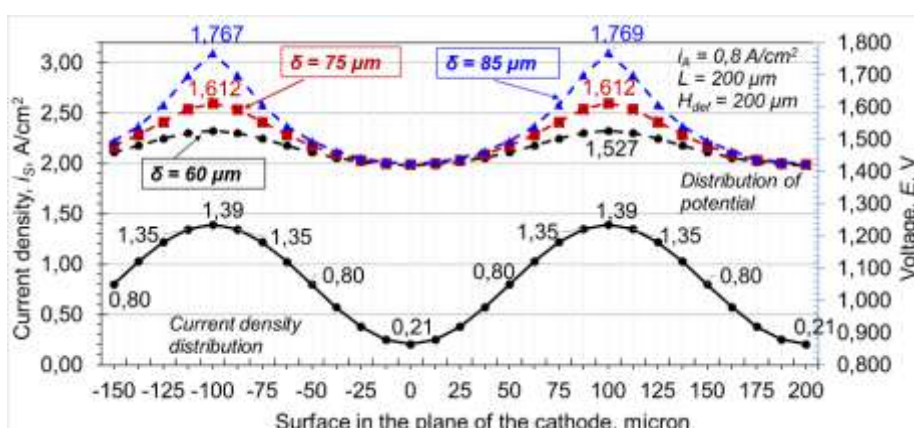


Fig. 12. Influence of δ on the E distribution
Рис. 12. Влияние δ на распределение E

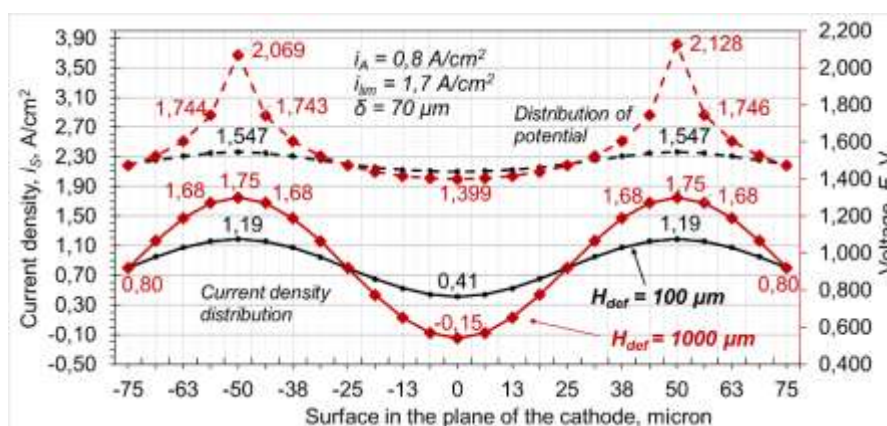


Fig. 13. Impact of the height of the defect on the distribution of i_s (continuous) and E (dashed)
Рис. 13. Влияние высоты дефектов на распределение i_s (сплошная) и E (пунктирная)

select technologically and constructively the optimum conditions for the operation of the electrodes. Physical and chemical heterogeneity is more difficult to influence in the manufacture of electrodes by moulding or casting. Attempts to

change/reduce initial roughness by mechanical methods, such as surface polishing, affect only the electrode start-up. The roughness parameters and the impurity profile of items change during the start-up and working cycle. More pre-

cisely, the presence or propagation of chemical heterogeneity of the surface and/or bulk of the item leads to physical heterogeneity during the electrode working cycle.

Notably, aluminium can discharge on the entire surface, including the recesses (see fig. 9–13). However, kinetically, i.e., without current and overpotential in the recesses, this process barely occurs, more precisely, it proceeds under equilibrium conditions. When present in the melt, conditions for discharge in the cavities are more favourable for electropositive ions. This element is boron, which is almost twice as electropositive as aluminium. Boron, if reduced in a recess, reacts, for example, with titanium or titanium oxide, and the resulting titanium diboride will flatten any inhomogeneities.

Thus, the functional relationship among the following parameters was established by simulating different scenarios of the interaction of the cathode polarisation level, geometric current density, stirring intensity (by δ) and the alumina concentration in the electrolyte on the smooth and rough surface:

The pronounced edge effect of current concentration, i.e., an increase in its density, is observed on the periphery of the nominally smooth electrodes and their internal perforated elements. The current and potential concentration on the edges, side surfaces of the openings and rods increases the cathode passivation or the anode consumption proportional to their total area.

An increase in the initial or acquired during the electrolysis surface defects of electrodes leads to the progressive heterogeneity of the current and potential distribution, increases the risk of the cathode passivation and/or electrochemical anode corrosion.

An elevation of the current alumina concentration in the electrolyte relative to its maximum content augments the limiting current density, but at the same time:

- deteriorates the scattering properties of the melt and the current micro-distribution on the micro-defects;
- increases the melt viscosity, diffusion near-cathode layer, consequently, gradually decreases the limiting current density.

The surface polarisation smooth out the cur-

rent distribution on the smooth and polycrystalline electrodes.

The intensification of the melt stirring, i.e., decreasing the diffusion layer thickness and levelling the concentration of the potential-determining ions in the electrolyte volume, increases maximum current density, equalises distribution and diminishes the absolute values of the electrode potential.

It is possible to reduce the heterogeneous current and potential distribution on the electrode surface with initial roughness by increasing the cathode polarisation, optimising the alumina concentration and melt circulation. However, initial physical heterogeneity can progress with the prolonged electrolysis in the presence of chemical heterogeneity, undermining all attempts to stabilise the process.

CONCLUSIONS

The above-discussed relationship between the edge effect and roughness and the current density and potential distribution over solid electrodes can act as a primary and unifying factor for their increased consumption, passivation and electrolytic process destabilisation in standard and low-melting electrolytes NaF(KF)-AlF₃-Al₂O₃. Nevertheless, this functional relationship can form the basis for developing the methods of equalising the electric field distribution over the anodes and cathodes area and, therefore, stabilising the electrolytic process. Presumably, the reduction in the number of components, elements and units of the electrode with sharp or chamfered edges and joints is one important condition to diminish the negative effects of current density at the edges. Any bulging parts and perforations within the electrode geometry should be excluded. However, the current is distributed over the area of solid electrodes in such a manner that the current density increases from the centre to the perimeter with the accumulation at the edges of the cathode and anode (fig. 7 and fig. 8). Possibly, a similar and adequate increase in resistance in the pole gap will minimise this effect on the periphery so that the current density does not change in width and over the area of electrodes. The elliptic form of electrodes with an acceptable increase in the pole gap from the centre to the periphery satisfies

these conditions. When the electrodes are vertically positioned, both the anode and cathode should be shaped elliptical in cross-section, while with the horizontal arrangement of electrodes - only the inert anode. For example, in [13], the nature of the corrosion in the oxygen-releasing anodes was investigated in the NaF – 53.6, AlF₃ – 41.2, CaF₂ – 4.0, MgF₂ – 1.2 (wt.%) melts at the current density of 0.5 A/cm² and the temperature of 960°C for 50–150 hours. An aluminium layer on the bottom of the crucible was used as the cathode.

Regardless of the composition, the anode deterioration proceeded with a higher rate in the samples along the sharp peripheral edge (D). The samples with the elliptic side surface underwent uniform corrosion (E).

However, only a special shape is not sufficient to conduct a stable process using solid electrodes, polycrystalline and cast, single-phase and multiphase, which a priori have physical and chemical heterogeneity in their bulk and surface structure. In the work [14], electrochemical micro-borating of carbon cathodes containing refractory metals and their oxides was proposed as one method of surface homogenisation directly in the electrolysis process. The same method can be applied virtually to any reactive or inert cathodes with the surface heterogeneity smoothed by the chemical interaction of

boron with the present impurities, hence equalising the surface physical state.

Thus, based on a relatively detailed examination and analysis of the problems of solid-cathode electrolysis - literature review, laboratory practice and theoretical calculations - a simple procedure for the electrolysis process has been elaborated: combined application of elliptical electrodes and electrochemical micro-borating of the cathodes. The validation of this method is one of the possible areas of further theoretical and laboratory research. It could also be one of the last attempts at commercialising inert electrode technology. The latter relates to several factors:

- The expectation of environmental and economic benefits from introducing inert electrode technology has been delayed. The closure of the project is stopped by huge funds that have not paid for themselves, invested in more than 70 years of technology development.

- Simple recommendations for process temperature reduction, electrode and electrolyte composition corrections [15–20] do not allow implementation in the industry;

- Current technologies have come close to the technological and economic indicators expected from introducing the inert electrode technology. The urge to continue work on inert anodes is being questioned [21];

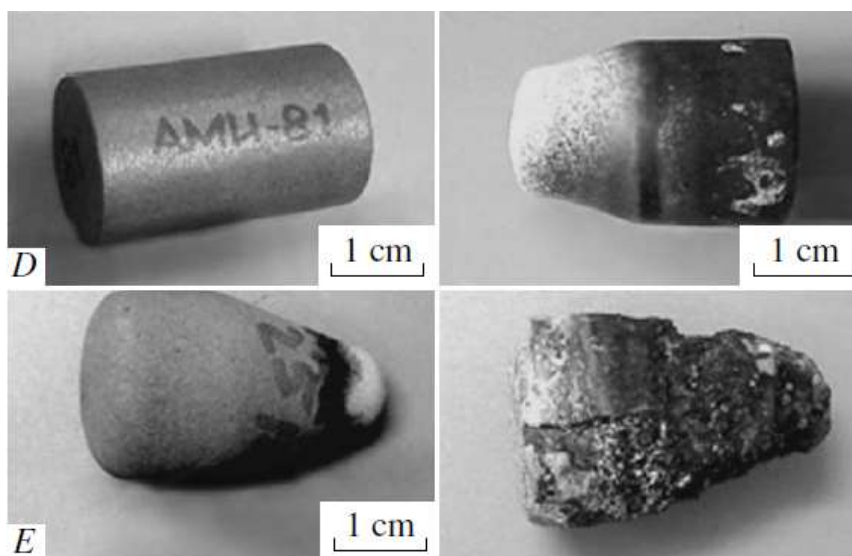


Fig. 14. Inert anode samples before (left) and after (right) the electrolysis [13]

(D) NiFe₂O₄-NiO-Cu cermet and (E) the metal-cermet composite

Рис. 14. Образцы инертных анодов до (слева) и после (справа) электролиза [13]

(D) NiFe₂O₄-NiO-Cu металлокерамика и (E) металл-керметный композит

– Greenhouse gas capture and separation technologies such as carbon capture and sequestration are highly standardised and ready for use [22–25];

– New directions and methods of aluminium electrolytic production appear, associated with the utilization of "waste" energy, saving energy resources and increasing production per unit of working space of the cell [26];

– There is no complete understanding of the impact of the local excess of oxygen in the atmosphere on human and the environment, as well as of fire safety in the major oxygen source area, for example, the aluminium plant with inert anodes. With increasing the oxygen partial

pressure in the atmosphere, the initial flash point, at which the vapours can ignite, lowers. In such an atmosphere, the fire can start with the spark generated by the friction of synthetic clothing with the human body [27].

However, in the near future, electrolysis of cryolite-alumina melts will remain the major industrial method of aluminium production. The ecology and electric power deficiency and their economic parameters encourage researchers to improve existing and develop new technologies. Potentially, we are at the turn of creating a new "Roadmap" of the development of the aluminium industry.

References

1. Kruglikov SS, Titova NV, Nekrasova NE, Kruglikova ES, Telezhkina AV, Brodsky VA, et al. Predicting microdistribution rate of metal electrodeposition from electrolytes with positive and negative leveling ability. *Elektrokhimiya*. 2019;55(1):78–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0424857018140050>
2. Ibl N. Current Distribution. In: Yeager E, Bockris JO, Conway BE, Sarangapani S (eds.). *Comprehensive treatise of electrochemistry*. Boston: Springer; 1983, p. 239–315. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6690-8_4
3. Newman J, Thomas-Alyea KE. *Electrochemical systems*. 3rd ed. New Jersey: Published by John Wiley & Sons; 2004, 647 p.
4. Gamburg YD, Zangari G. Theory and practice of metal electrodeposition, 2019, 439 p. (Russ. ed.: *Teoriya i praktika elektroosazhdeniya metallov*. Moscow. Binom, Laboratoriya znaniy, 2019, 439 p.)
5. Baraboshkin NA. *Electrocrystallization of metals from molten electrolytes*. Moscow: Nauka; 1976, 279 p. (In Russ.)
6. Vetyukov MM, Tsyplakov AM, Shkolnikov SN. *Metallurgy of aluminum and magnesium*. Moscow: Metallurgiya; 1987, 320 p. (In Russ.)
7. Grjotheim K, Krohn C, Malinovsky M, Matiasovsky K, Thonstad J. *Aluminium electrolysis fundamentals of the Hall-Heroult process*. 2nd ed. Dusseldorf: Aluminium-Verlag; 1982, p. 360.
8. Nikolaev AYU, Yasinskiy AS, Suzdaltsev AV, Polyakov PV, Zaikov YuP. Aluminum Electrolysis in the $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ Melts and Suspensions. *Raspilav*. 2017;3:205–213. (In Russ.)
9. Nikolaev AYU, Yasinskiy AS, Suzdaltsev AV, Polyakov PV, Zaikov YuP. Voltammetry in the $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ Melt and Suspensions. *Raspilav*. 2017;3:214–224. (In Russ.)
10. Nikolaev AYU, Suzdaltsev AV, Zaikov YuP. Cathode Process in the $\text{KF-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ Melts. *Journal of the Electrochemical Society*. 2019;166(15):D784–D791. <https://doi.org/10.1149/2.0521915jes>
11. De Nora V, Nguyen T. Inert anode: Challenges from fundamental research to industrial application. In: *Light Metals – 2009: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition*. 15–19 February 2009, San Francisco. San Francisco; 2009, p. 417–421.
12. Wang Zhaohui, Friis J, Ratvik AP. Transport of Sodium in TiB_2 Materials Investigated by a Laboratory Test and DFT Calculations. In: Martin O (eds.). *Light Metals 2018*. TMS 2018: The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer; 2018, p. 1321–1328. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_173
13. Kovrov VA, Shurov NI, Khramov AP, Zaikov YuP. Character of the corrosion destruction of inert anodes during electrolysis of cryolite alumina melt and the reasons for it. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2009;50(5):492–499. <https://doi.org/10.3103/S1067821209050113>
14. Gorlanov ES. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 2. The mechanism of passivation and conditions of stable electrolysis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):108–121. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-108-121>
15. Brown CW. The wettability of TiB_2 -based cathodes in low-temperature slurry-electrolyte reduction cells. *JOM*. 1998;50(5):38–40.
16. Wang J, Lai Y, Tian Z, Liu Y. Investigation of $5\text{Cu-(10NiO-NiFe}_2\text{O}_4)$ inert anode corrosion during low temperature aluminum electrolysis. In: *Light Metals – 2007: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2007 Annual Meeting and Exhibition*. Part 2. 25 February – 1 March 2007, Orlando. Orlando; 2007, p. 525–530.
17. Zaikov Yu, Khramov A, Kovrov V, Kryukovsky V, Apisarov A, Chemesov O, et al. Electrolysis of aluminum in the low melting electrolytes based on potassium cryo-

- lite. In: *Light Metals – 2008: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2008 Annual Meeting and Exhibition*. Part 2. 9–12 March 2008, New Orleans. New Orleans; 2008, p. 505–508.
18. Tkacheva O, Hryn J, Spangenberg J, Davis B, Alcorn T. Operating Parameters of Aluminum Electrolysis in a KF-AlF₃ BASED Electrolyte. In: Suarez CE (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2012, p. 675–680. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_116
19. Hryn JN, Tkacheva OY, Spangenberg JS. UltraHigh-efficiency aluminum production cell. In: *Report of Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. Award Number: DE-AC02-06CH11357*. April 2014. P. 86. Available from: <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/ultrahigh-efficiency-aluminum-production-cells> [Accessed 19th August 2020].
20. Bao Shengzhong, Chai Dengpeng, Shi Zhirong, Wang Junwei, Liang Guisheng, Zhang Yanan. Effects of Current Density on Current Efficiency in Low Temperature Electrolysis with Vertical Electrode Structure. In: Martin O (eds.). *Light Metals. 2018. TMS 2018: The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2018, p. 611–619 https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79
21. Solheim A. Inert Anodes – the Blind Alley to Environmental Friendliness? In: Martin O (eds.). *Light Metals 2018. TMS 2018: The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2018, p. 1253–1260. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_164
22. Sheppard MC, Socolow RH. Sustaining fossil fuel use in a carbon-constrained world by rapid commercialization of carbon capture and sequestration. *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 2007;53(12):3022–3028. <https://doi.org/10.1002/aic.11356>
23. Lorentsen O-A, Dyrøy A, Karlsen M. Handling CO₂EQ from an Aluminum Electrolysis Cell. In: *Light Metals – 2009: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition*. 15–19 February 2009, San Francisco. San Francisco; 2009, p. 263–268. <https://doi.org/10.1002/9781118647851.ch144>
24. Jilvero H, Mathisen A, Eldrup N-H, Normann F, Johnsson F, Müller GI, Melaaen MC. Techno-economic Analysis of Carbon Capture at an Aluminum Production Plant – Comparison of Post-combustion Capture Using MEA and Ammonia. *Energy Procedia*. 2014;63:6590–6601. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.695>
25. Matteucci ST, Lopez LC, Feist ShD, Nickias P, Harrise WJ. *Separation of acid components using self-organising polymer membranes*. Patent RF, no. 2534772; 2014. (In Russ.)
26. Gorlanov ES, Kawalla R, Polyakov AA. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 2. Development prospects. *Tsvetnye Metally*. 2020;10:42–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>
27. Marshall VC. Major chemical hazards, 1989, 671 p. (Russ. ed.: *Osnovnye opasnosti himicheskikh proizvodstv*. Moscow, Mir, 1989, 671 p.)

Список литературы

1. Кругликов С.С., Титова Н.В., Некрасова Н.Е., Кругликова Е.С., Тележкина А.В., Бродский В.А. [и др.] Прогнозирование микрораспределения скорости электроосаждения металла из электролитов с положительной и отрицательной выравнивающей способностью // *Электрохимия*. 2019. Т. 55. № 1. С. 78–84. <https://doi.org/10.1134/S0424857018140050>
2. Ibl N. Current Distribution // *Comprehensive Treatise of Electrochemistry* / eds. E. Yeager, J.O. Bockris, B.E. Conway, S. Sarangapani. Boston: Springer; 1983, p. 239–315. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6690-8_4
3. Newman J., Thomas-Alyea K.E. *Electrochemical systems*. 3rd ed. New Jersey: Published by John Wiley & Sons, 2004. 647 p.
4. Гамбург Ю.Д., Зангари Дж. Теория и практика электроосаждения металлов: монография / пер. с англ. Ю.Д. Гамбург. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2019. 439 с.
5. Барабошкин Н.А. *Электрокристаллизация металлов из расплавленных электролитов*. М.: Наука, 1976. 279 с.
6. Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. *Металлургия алюминия и магния*. М.: Metallurgy, 1987. 320 с.
7. Grjotheim K., Krohn C., Malinovsky M., Matiasovsky K., Thonstad J. *Aluminium electrolysis fundamentals of the Hall-Heroult process*. 2nd ed. Dusseldorf: Aluminium-Verlag, 1982. 360 p.
8. Николаев А.Ю., Ясинский А.С., Суздальцев А.В., Поляков П.В., Зайков Ю.П. Электролиз алюминия в расплавах и суспензиях KF-AlF₃-Al₂O₃ // *Расплавы*. 2017. № 3. С. 205–213.
9. Николаев А.Ю., Ясинский А.С., Суздальцев А.В., Поляков П.В., Зайков Ю.П. Вольтамперометрия в расплаве и суспензиях KF-AlF₃-Al₂O₃ // *Расплавы*. 2017. № 3. С. 214–224.
10. Nikolaev A.Yu., Suzdaltsev A.V., Zaikov Yu.P. Cathode process in the KF-AlF₃-Al₂O₃ melts // *Journal of the Electrochemical Society*. 2019. Vol. 166. No. 15. P. D784–D791. <https://doi.org/10.1149/2.052191jes>
11. De Nora V., Nguyen T. Inert anode: Challenges from fundamental research to industrial application // *Light Metals – 2009: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition* (San Francisco, 15–19 February, 2009). San Francisco, 2009. P. 417–421.
12. Wang Zhaohui, Friis J., Ratvik A.P. Transport of sodium in TiB₂ materials investigated by a laboratory test and DFT calculations // *Light Metals 2018. TMS 2018: The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. O. Martin. Cham: Springer, 2018. P. 1321–1328. http://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_173
13. Kovrov V.A., Shurov N.I., Khramov A.P., Zaikov Yu.P. Character of the corrosion destruction of inert anodes during electrolysis of cryolite alumina melt and the rea-

sons for it // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2009. Vol. 50. No. 5. P. 492–499.

<https://doi.org/10.3103/S1067821209050113>

14. Горланов Е.С. К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 2. Механизм пассивации и условия стабильного электролиза // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 1. С. 108–121. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-108-121>

15. Brown C.W. The wettability of TiB₂-based cathodes in low-temperature slurry-electrolyte reduction cells // JOM. 1998. Vol. 50. Iss. 5. P. 38–40.

16. Wang J., Lai Y., Tian Z., Liu Y. Investigation of 5Cu-(10NiO-NiFe₂O₄) inert anode corrosion during low temperature aluminum electrolysis // Light Metals – 2007: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2007 Annual Meeting and Exhibition (Orlando, 25 February – 1 March 2007). Part 2. Orlando, 2007. P. 525–530.

17. Zaikov Yu., Khranov A., Kovrov V., Kryukovsky V., Apisarov A., Chemesov O., et al. Electrolysis of aluminum in the low melting electrolytes based on potassium cryolite // Light Metals – 2008: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2008 Annual Meeting and Exhibition (New Orleans, 9–12 March 2008). Part 2. New Orleans, 2008. P. 505–508.

18. Tkacheva O., Hryn J., Spangenberg J., Davis B., Alcorn T. Operating parameters of aluminum electrolysis in a KF-AlF₃ BASED electrolyte // Light Metals / eds. C.E. Suarez. Cham: Springer, 2012. P. 675–680. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_116

19. Hryn J.N., Tkacheva O.Y., Spangenberg J.S. Ultra-High-efficiency aluminum production cell // Report of Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. Award Number: DE-AC02-06CH11357. April 2014. P. 86. [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/ultrahigh-efficiency-aluminum-production-cells> (19.08.2020).

20. Bao Shengzhong, Chai Dengpeng, Shi Zhirong, Wang Junwei, Liang Guisheng, Zhang Yanan. Effects of current density on current efficiency in low temperature electroly-

sis with vertical electrode structure // Light Metals 2018. TMS 2018: The Minerals, Metals & Materials Series / eds. O. Martin. Cham: Springer, 2018. P. 611–619. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79

21. Solheim A. Inert anodes – the blind alley to environmental friendliness // Light Metals 2018. TMS 2018: The Minerals, Metals & Materials Series / eds. O. Martin. Cham: Springer, 2018. P. 1253–1260. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_164

22. Sheppard M.C., Socolow R.H. Sustaining fossil fuel use in a carbon-constrained world by rapid commercialization of carbon capture and sequestration // American Institute of Chemical Engineers Journal. 2007. Vol. 53. Iss. 12. P. 3022–3028. <https://doi.org/10.1002/aic.11356>

23. Lorentsen O.-A., Dyrøy A., Karlsen M. Handling CO₂EQ from an aluminum electrolysis cell // Light Metals – 2009: Proceedings of the Technical Sessions Presented by the TMS Aluminum Committee at the TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition (San Francisco, 15–19 February, 2009). San Francisco, 2009. P. 263–268. <https://doi.org/10.1002/9781118647851.ch144>

24. Jilvero H., Mathisen A., Eldrup N.-H., Normann F., Johnsson F., Müller G.I., Melaaen M.C. Techno-economic analysis of carbon capture at an aluminum production plant – comparison of post-combustion capture using MEA and ammonia // Energy Procedia. 2014. Vol. 63. P. 6590–6601. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.695>

25. Пат. № 2534772, Российская Федерация, МПК B01D 71/48. Отделение кислых компонентов с помощью мембран из самоорганизующегося полимера / С.Т. Маттеуччи, Л.К. Лопес, Ш.Д. Фейст, П. Никиас, У.Дж. Харрис; заявитель и патентообладатель Дау Глобал Текнолоджиз. № 2012139032/05. Заявл. 11.02.2011; опубл. 10.12.2014. Бюл. № 8. 34 с.

26. Горланов Е.С., Кавалла Р., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 2. Перспективные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 42–49.

<https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>

27. Маршалл В.К. Основные опасности химических производств / пер. с англ. Г.Б. Барсамяна. М.: Мир, 1989. 671 с.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy S. Gorlanov,

Dr. Sci. (Eng.),

Deputy General Director of EXPERT-AL LLC,

86/A, Sredniy pr., V.O. Saint-Petersburg 199106, Russia;

✉ e-mail: gorlanove@yandex.ru

Andrey A. Polyakov,

Postgraduate Student,

Saint Petersburg Mining University,

9/30 Transportny lane, Saint Petersburg 191119, Russia;

e-mail: polyakovandrey@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горланов Евгений Сергеевич,

доктор технических наук, заместитель

генерального директора,

ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ»,

199106, г. Санкт-Петербург, Средний просп. В.О.,

86/А, Россия;

✉ e-mail: gorlanove@yandex.ru

Поляков Андрей Александрович,

аспирант,

Санкт-Петербургский горный университет,

191119, г. Санкт-Петербург, Транспортный пер., 9/30,

Россия;

e-mail: polyakovandrey@yandex.ru

Contribution of the authors

Gorlanov E.S. was responsible for conceptualization, methodology, calculations, copywriting. Polyakov A.A. performed the research, analyzed the literature, processed and verified data, wrote the text of the 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 02.02.2021; approved after reviewing 17.03.2021; accepted for publication 29.04.2021.

Заявленный вклад авторов

Горланов Е.С. – концептуализация, методология, расчеты, написание текста. Поляков А.А. – исследование, анализ литературы, обработка и проверка данных, написание текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.02.2021; одобрена после рецензирования 17.03.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки

© Н.В. Немчинова, В.В. Хоанг, И.И. Апончук

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – провести аналитические исследования химического состава рафинировочного шлака кремниевого производства для выбора путей его дальнейшей переработки. Объектом исследований явились образцы шлака после окислительного рафинирования с АО «Кремний» компании «РУСАЛ» (г. Шелехов Иркутской обл., Россия). Исследования химического состава образцов шлака проводили рентгенофазовым, рентгенофлуоресцентным, металлографическим методами исследования, а также методом сканирующей электронной микроскопии. В результате проведенных аналитических исследований было установлено, что основные составляющие рафинировочного шлака в основном представлены элементарным кремнием, его карбидом и оксидом. Также присутствует углерод в элементарном виде. Показано, что карбид кремния является продуктом недовосстановления карботермического процесса в руднотермической печи. По данным рентгенофлуоресцентного анализа в образце шлака кроме кремния содержатся, % масс.: Ca – 7,40; Al – 3,80; Fe – 0,30; Ba – 0,19; K – 0,14; Na – 0,09; Sr – 0,09; Mg – 0,08; Ti – 0,05; S – 0,02. Кальций и алюминий присутствуют в шлаке в основном в виде оксидов, также фиксируются сложные оксиды типа анортита: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. В незначительном количестве присутствуют оксиды других металлов, переходящие в рафинировочный шлак в составе печного шлака, образующегося при плавке кремнеземсодержащего сырья. Шлаки окислительного рафинирования производства кристаллического кремния являются техногенным сырьем, содержащим ценные компоненты. Ввиду значительного содержания в рафинировочном шлаке кремния (от 42% до 65%) проведен анализ основных способов переработки данного техногенного сырья для доизвлечения кремния или получения товарных кремнийсодержащих продуктов, востребованных в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: производство кремния, рафинирование кремния, шлак, примеси, металлография

Для цитирования: Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 252–263. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-252-263>

Research into the chemical composition of refinery slag from silicon production for its efficient recycling

Nina V. Nemchinova, Vien V. Hoang, Irina I. Aponchuk

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim was to investigate the chemical composition of refinery slag obtained during silicon production in order to identify approaches to its further recycling. Research samples were collected from the slag remained after oxidation refining at the JSC Silicon (AO Kremny), RUSAL (Shelekhov, Irkutsk Oblast). The methods of X-ray phase, X-ray fluorescence, metallographic and scanning electron microscopy were employed to investigate the chemical composition of the samples. It was found that the refinery slag under study includes such basic components as elemental silicon, its carbide and oxide, as well as elemental carbon. It was shown that silicon carbide is the product of incomplete reduction, resulting from melting silica-containing ores in a smelting furnace. According to the conducted X-ray fluorescent analysis, the samples also contain (wt %): Ca – 7.40; Al – 3.80; Fe – 0.30; Ba – 0.19; K – 0.14; Na – 0.09; Sr – 0.09; Mg – 0.08; Ti – 0.05; S – 0.02. Calcium and aluminium are present in the slag mostly in the form of oxides. Complex oxides of an anorthite type were also found: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. The refinery slag under study also features insignificant amounts of other metal oxides, which are released from the furnace slag forming during the smelting process. The slag produced by oxidation refining during crystalline silicon production is a technogenic raw material containing valuable components. Due to the significant content of silicon in the refinery slag (from 42% to 65%), the existing methods applied to recycle such an

industrial material were analysed in terms of additional silicon extraction or production of commercial silicon-containing products, which are in demand in various industries.

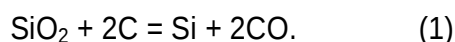
Keywords: silicon production, silicon refining, slag, impurities, metallography

For citation: Nemchinova NV, Hoang VV, Aponchuk II. Research into the chemical composition of refinery slag from silicon production for its efficient recycling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):252–263. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-252-263>

ВВЕДЕНИЕ

Металлургическая отрасль является неотъемлемой частью развитых мировых стран, в том числе и России [1, 2]. Metallurgical silicon ($Si_{мет}$) широко используется как раскислитель при производстве чугуна, в качестве модификатора свойств различных сплавов и легирующего элемента в них, сырья для получения поликристаллического кремния, кремнийорганических материалов и силанов [3–7]. Производство $Si_{мет}$ развивается за счет расширения сырьевой базы путем вовлечения в производство новых видов рудного и техногенного сырья, совершенствования оборудования и технологических процессов [8–14]. Годовой объем производства metallurgical silicon достигает ≈ 1 млн т, Китай является крупнейшим производителем. Норвежская компания «Elkem» по объемам производства кремния занимает 2 место. В России единственным производителем кремния для различных отраслей потребления является АО «Кремний» ОК «РУСАЛ» (г. Шелехов, Иркутская обл.).

$Si_{мет}$ в АО «Кремний» получают при высоких температурах (свыше $2000^{\circ}C$) в руднотермических печах (РТП) из кремнеземсодержащего сырья восстановлением углеродом по основной реакции [4, 8, 15, 16]:



Шихтой для получения кремния служит кварцит Черемшанского месторождения, являющегося рудной базой предприятия, и смесь углеродистых восстановителей (УВ): древесный уголь, нефтяной кокс, каменный уголь различных производителей. Получение

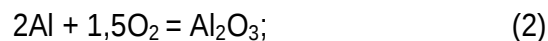
кремния происходит через стадии образования карборунда и газообразного монооксида кремния [3, 4, 7, 15]. Многостадийность процесса обуславливает неполноту протекания химических реакций, что вызывает недовосстановление кремния из карборунда и металлов из их оксидов из золы УВ и примесей кварцита.

Производство кремния относится к бесшлаковым в отличие от аналогичных процессов производства ферросплавов [3, 17], однако в процессе плавки кремнеземсодержащей шихты в мощных РТП образуется до 5%, а в печах малой и средней мощности – 2–3%. Образование шлака, в котором всегда присутствует кремний, снижает общее извлечение целевого продукта в карботермическом процессе: в среднем, соответственно, на 2,2 и 1,2%, в зависимости от мощности печи [3, 4].

Для получения товарного продукта, удовлетворяющего требованиям потребителей, выплавляемый кремний должен содержать минимальное количество примесей (Fe, Ca, Al, Ti и др.). Для этого на АО «Кремний» используется окислительное рафинирование кремния.

После выпуска кремния из печи проводится его рафинирование в ковше продувкой воздухом или кислородом с добавкой флюса (кварцевого песка, согласно ГОСТ 22551-77¹, марки ОСВ-020-В), рис. 1.

Основные реакции, описывающие процесс рафинирования выплавляемого кремния, следующие:



¹ГОСТ 22551-77. Песок кварцевый, молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия (с изм.). Введ. 01.01.1979. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997.



Реакция (8) способствует наличию аморфной кремнеземсодержащей фазы в шлаках.

Однако реакции (2)–(8) отражают лишь общую суть окисления расплавленного кремния [3, 4]. Анализ же литературных данных показывает, что процесс окисления примесей кремния кислородом образует рафинировочный шлак, имеющий в своем составе CaO , Al_2O_3 , SiO_2 и кремния с включениями SiC и корольками кремния. Также в шлак полностью переходит печной шлак, представляющий собой продукт из невосстановленных оксидов и неразложившегося карборунда [18, 19]. Ввиду близости плотности рафинировочного шлака к плотности кремния затрудняется отделение кремниевой фазы от шлака, что приводит к потерям кремния.

Данный промышленный способ требует малых эксплуатационных затрат и позволяет

удалить из кремния алюминий, кальций, титан, фосфор при использовании незначительного количества флюсов. Карбид кремния (как продукт недовосстановления в процессе плавки) переходит в рафинировочный шлак при отстаивании.

Исследования химического состава образцов проводили рентгенофазовым, рентгенофлуоресцентным (РФА), металлографическими методами исследования, а также методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), относящиеся к современным методам изучения характеристик сырья и продуктов кремниевого производства [18].

ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШЛАКОВ КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Объектами исследований явились образцы рафинировочных шлаков АО «Кремний». Плотные материалы, к каким относится рафинировочный шлак (рис. 2), для аналитических исследований (рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализы) должны быть измельчены в дробильном устройстве с дальнейшим доизмельчением до получения материала с диаметром зерен меньше 50 мкм. Для исследований микроструктуры и поверхности образцов электронно-микроскопическим и металлографическим методами анализа необходима подготовка шлифов со шлифованием и полированием.

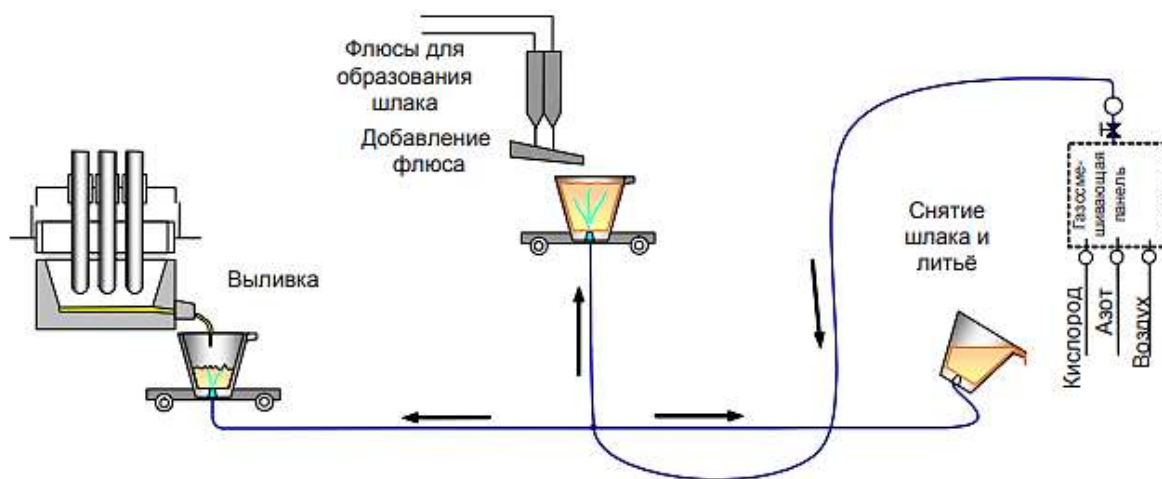


Рис. 1. Окислительное рафинирование металлургического кремния в АО «Кремний»
Fig. 1. Oxidizing refining of metallurgical silicon at Silicon JSC



Рис. 2. Рафинировочный шлак кремниевого производства в АО «Кремний»: а – общий вид;
 b – фото измельченного образца шлака (сканирующая электронная микроскопия, увеличение x100)
 Fig. 2. Refinery slag of silicon production at Silicon JSC: a – general view;
 b – image of a crushed slag sample (scanning electron microscopy, 100x magnification)

Для проведения РФА, СЭМ и рентгенофазового анализа образцы шлаков подвергали дроблению в лабораторной щековой дробилке ШД 10 м («Вибротехник», Россия). Затем раздробленный на куски материал перемешивали и подвергали повторному измельчению. Далее истирали до порошкообразного состояния в агатовой ступке для получения пригодных для анализа проб. Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе JIB-Z4500 («JEOL», Япония), см. рис. 2 b.

Рентгенофазовый анализ образцов шлака. Согласно данным химического и рентгенофазового анализа, выполненного на дифрактометре «ДРОН-7» (Россия) в АО «Кремний», основными компонентами шлака являются (табл. 1) карбид и оксид кремния, аморфный кремнезем, включения углерода и

кремния, а также сложные оксиды как продукты недовосстановления карботермического процесса (в частности, анортит [19]).

Рентгенофазовый анализ исследуемых образцов рафинировочного шлака был выполнен с помощью рентгеновского дифрактометра XRD-7000 («Shimadzu», Япония) с вертикальным θ - θ гониометром. Съемка проводилась с использованием Cu_α -излучения в пошаговом режиме в диапазоне углов 2θ от 3 до 80°. Для идентификации фаз исследуемых образцов использовалась база порошковых дифрактограмм PDF-2. Проведенный анализ пробы шлака также подтвердил наличие основных соединений в продукте рафинирования: Si, SiC, 2 вида SiO_2 (низкотемпературный кристобалит и низкотемпературный кварц), рис. 3.

Таблица 1. Фазовый состав кремниевого шлака (данные АО «Кремний»)

Table 1. Phase composition of silicon slag (data of Silicon JSC)

Компонент	Состав шлака, % масс.		
	РТП-6	РТП 1,2 (средние значения)	РТП-3,4 (средние значения)
Si	44,1	65,3	42,1
SiC	3,3	3,1	12,1
C	–	1,1	0,9
SiO_2 (кварцит)	2,9	1,9	–
SiO_2 (кристобалит)	2,2	4,6	2,6
$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (анортит)	26	–	–
SiO_2 (аморфная фаза)	21,5	24	42,3

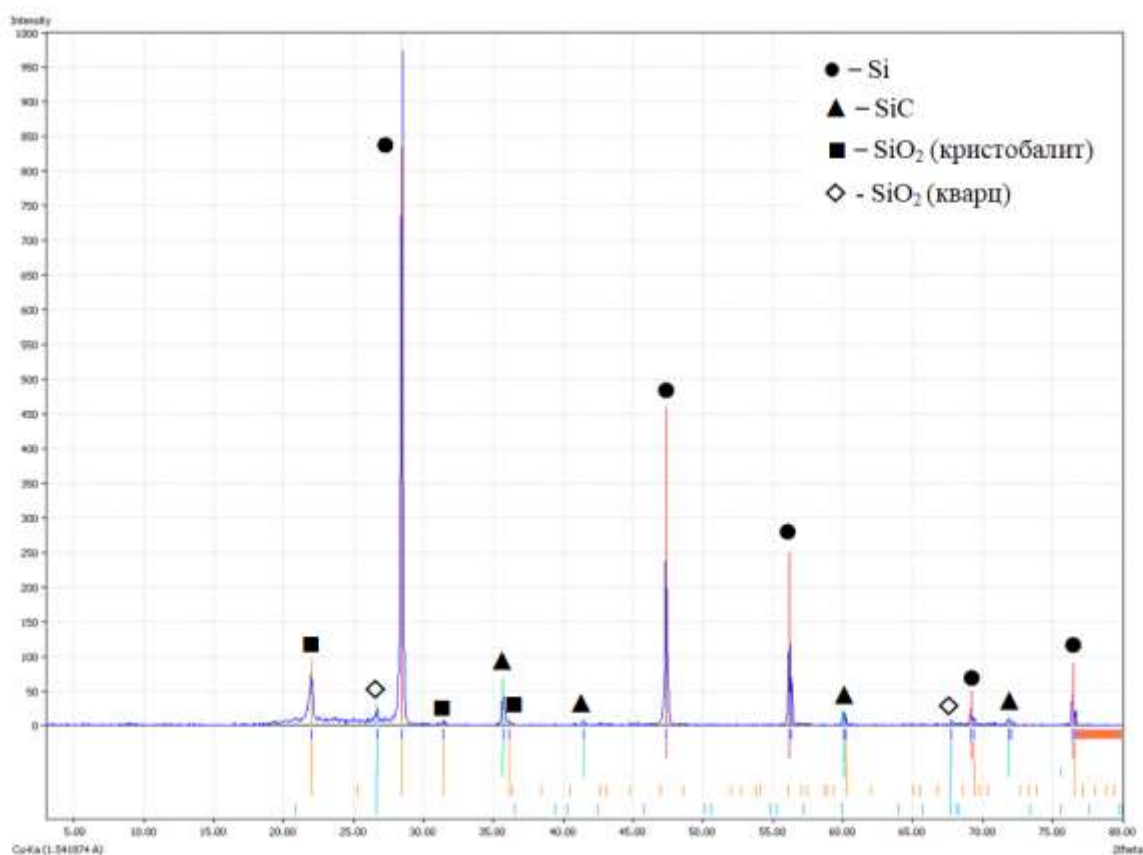


Рис. 3. Дифрактограмма образца рафинировочного шлака
Fig. 3. Diffraction pattern of a refinery slag sample

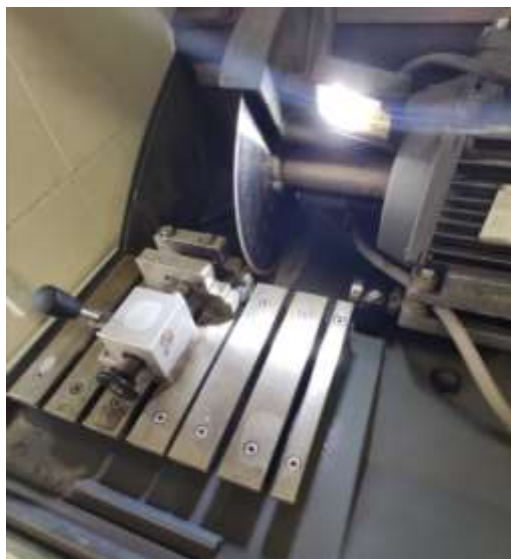
Рентгенофлуоресцентный анализ пробы рафинировочного шлака. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ образцов шлака выполняли с помощью спектрометра марки S4 Pioneer («Bruker AXS», Германия). Согласно данным РФА, шлак содержит помимо элементного кремния другие элементы, % масс.: Ca – 7,40; Al – 3,80; Fe – 0,30; Ba – 0,19; K – 0,14; Na – 0,09; Sr – 0,09; Mg – 0,08; Ti – 0,05; S – 0,02. Поскольку шлак содержит кремний, то железо, по нашему мнению, входит в состав интерметаллических соединений – силицидов (чаще всего с примесью титана), всегда присутствующих в выплавляемом кремнии [20]. Присутствие серы можно объяснить наличием частиц углерода в шлаках (табл. 2), в состав которого входит данный элемент [21].

Металлографический анализ шлифов шлака. Металлографическое изучение исследуемого объекта исследований проводили с помощью инвертированного металлографического микроскопа «Olympus GX-51»

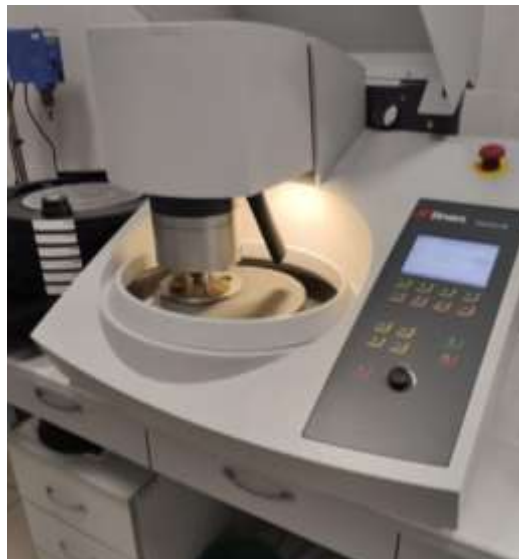
(«Olympus», Япония), оснащенного цифровой камерой Altra20. Металлографический метод исследований требует высококачественной (специальной) подготовки образца для исследований: резка образцов, запрессовка проб для подготовки образцов к шлифовке, шлифование и полировка.

Для изучения микроструктуры шлака образцов пробоподготовка к металлографическим исследованиям включала в себя получение срезов от общего куска шлака с помощью отрезного станка «Labotom-15» фирмы «Struers» (Дания), рис. 4 а. Далее обрезанные по требуемым размерам куски шлака для последующей шлифовки заливались акриловой смолой DuroCit, обладающей коротким временем затвердевания и незначительной усадкой.

Шлифование и полировка образцов шлака осуществлялись на шлифовально-полировальном станке «Tegramin-25» («Struers», Дания), рис. 4 б.



a



b

Рис. 4. Подготовки образцов к металлографическим исследованиям: а – отрезной станок Labotom-5; б – шлифовально-полировальный станок Tegramin-25

Fig. 4. Sample preparation for metallographic studies: a – Labotom-5 cut-off machine; b – Tegramin-25 grinding and polishing machine

На вращающуюся платформу с магнитной подложкой прикрепляется шлифовальный диск. После установки платы вращателя образцов в правильное положение над пробой подготовительной поверхностью соединение вращателя образцов фиксируется. В «Tegramin» встроена база данных с 200 методами подготовки образцов.

В наших исследованиях (см. табл. 2) были использованы 3 режима работы с различными лубрикантами: Piano 220 – вода; Largo – DiaPro All/Lar (9 мкм); Mol – DiaDuo-2 (3 мкм). Использование DiaDuo-2 (алмазной суспензии с лубрикантом) позволяет максимально сократить расход используемых дорогостоящих алмазосодержащих продуктов, а также оптимально подходит для дозирования вручную и обеспечивает при этом идеальную поверхность микрошлифа. Обработка образцов проводилась различными дисками с последующей полировкой алмазными суспензиями различной крупности (9 мкм, 3 мкм, см. табл. 2).

На рис. 5 приведены фото участков трех образцов шлака.

Обработка изображений трех образцов шлака проводилась в программе «SIAMS Photolab», широко используемой для изуче-

ния различных металлсодержащих материалов [22, 23].

На рис. 6, 7 приведены примеры обработки в программе результатов изображения участка поверхности образца кремниевого шлака № 1: размеры зерен кремния и его содержание в образце, соответственно.

Результаты обработки изображения образцов кремниевого шлака представлены в табл. 3.

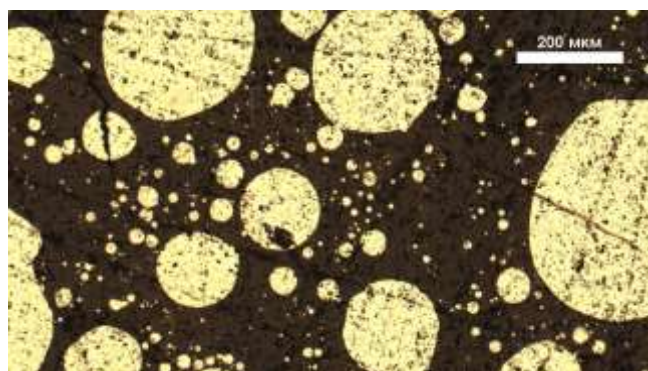
Как видно из представленных в табл. 3 результатов, образцы шлаков отличаются по количеству частиц различного размера. Доля кремния в образце шлака № 1 составляет 41,7% и, как видно из представленных в табл. 3 результатов, образцы шлаков различаются по количеству частиц различного размера. Доля кремния в образце шлака № 1 составляет 41,7% и он представлен более крупными включениями до 370,34 мкм. Образцы шлаков № 2 и № 3 содержат меньшее количество включений кремния диаметром до 107,09 мкм и 98,43 мкм, соответственно. Среднеквадратичное отклонение размеров частиц образцов шлаков № 2 и № 3 составляет 15 мкм, что свидетельствует о более однородной структуре этих образцов по распределению частиц в пробе.

Таблица 2. Условия выравнивания, шлифования и полирования
Table 2. Conditions for flattening, grinding and polishing

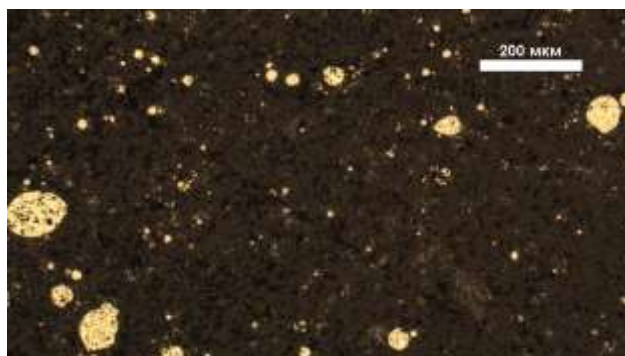
Поверхность	Лубрикант	Время, мин	Усилие, Н	Скорость, об/мин
Piano 220	Вода	90	40	300
Largo	DiaPro All/Lar	180	40	150
Mol	DiaDuo-2	150	45	150

Таблица 3. Значения размеров зерен и доли кремния в образцах шлака
Table 3. Values of grain sizes and silicon proportion in slag samples

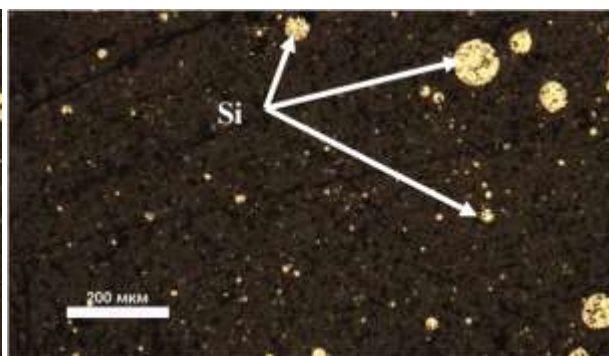
Наименование показателя	Вид образца		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Число частиц	223	112	114
Минимальное значение, мкм	6,38	6,38	6,38
Максимальное значение, мкм	370,34	107,09	98,43
Среднее значение, мкм	25,22	15,09	14,52
Среднеквадратичное отклонение, мкм	44,40	15,17	15,14
Медиана, мкм	11,57	10,25	9,76
Диапазон, мкм	9,00	5,65	4,68
Доля, %	41,7	3,9	3,6
Удельная поверхность, 1/мкм	0,028	0,007	0,007
Средняя хорда, мкм	59,3	21,3	19,8
Межчастичное расстояние, мкм	82,9	521,3	532,2



a



b



c

Рис. 5. Фото образцов кремниевого шлака (металлографическое исследование) при увеличении $\times 50$: **a** – образец 1; **b** – образец 2; **c** – образец 3
Fig. 5. images of silicon slag samples (metallographic study) at 50x magnification: **a** – sample 1; **b** – sample 2; **c** – sample 3

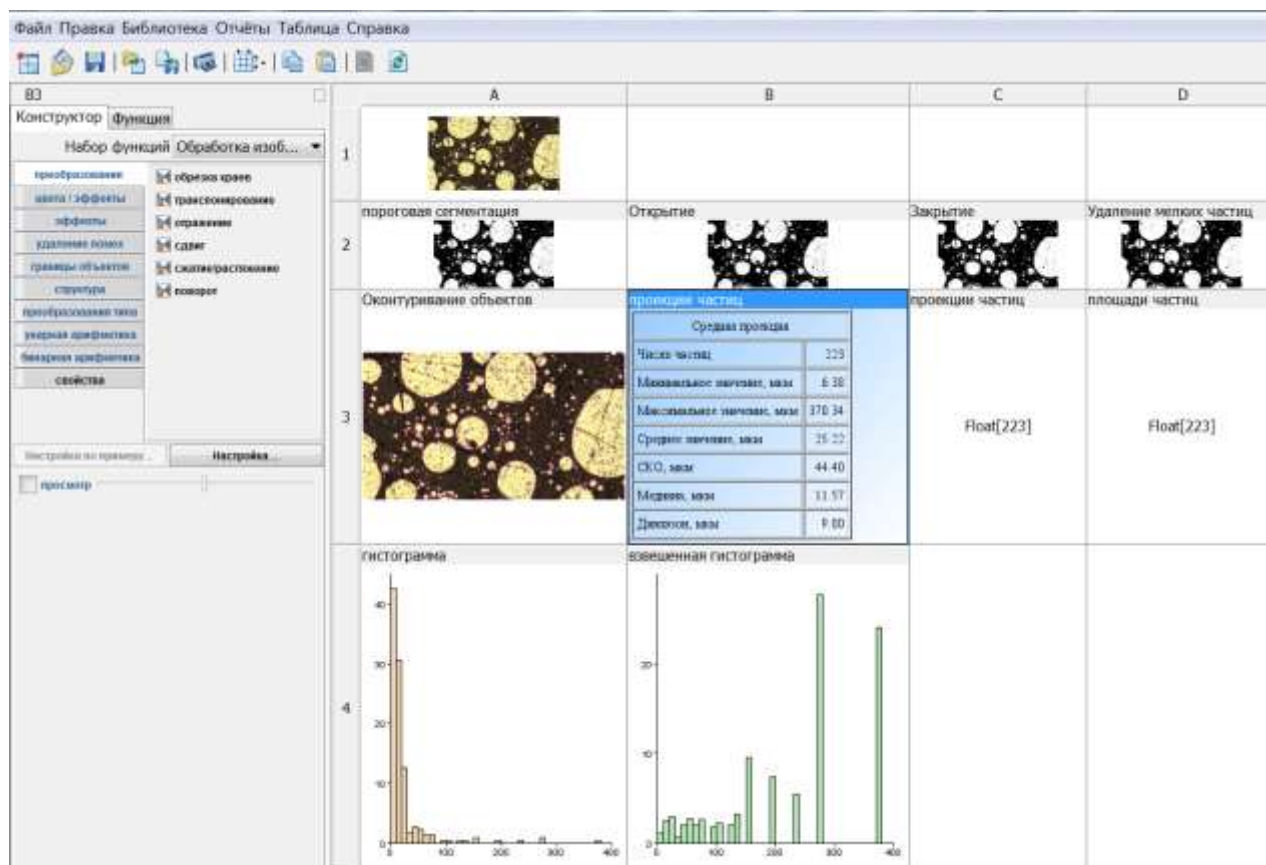


Рис. 6. Результаты обработки изображений образца шлака № 1 – характеристики включений
 Fig. 6. Results of slag no. 1 image processing – inclusion characteristics

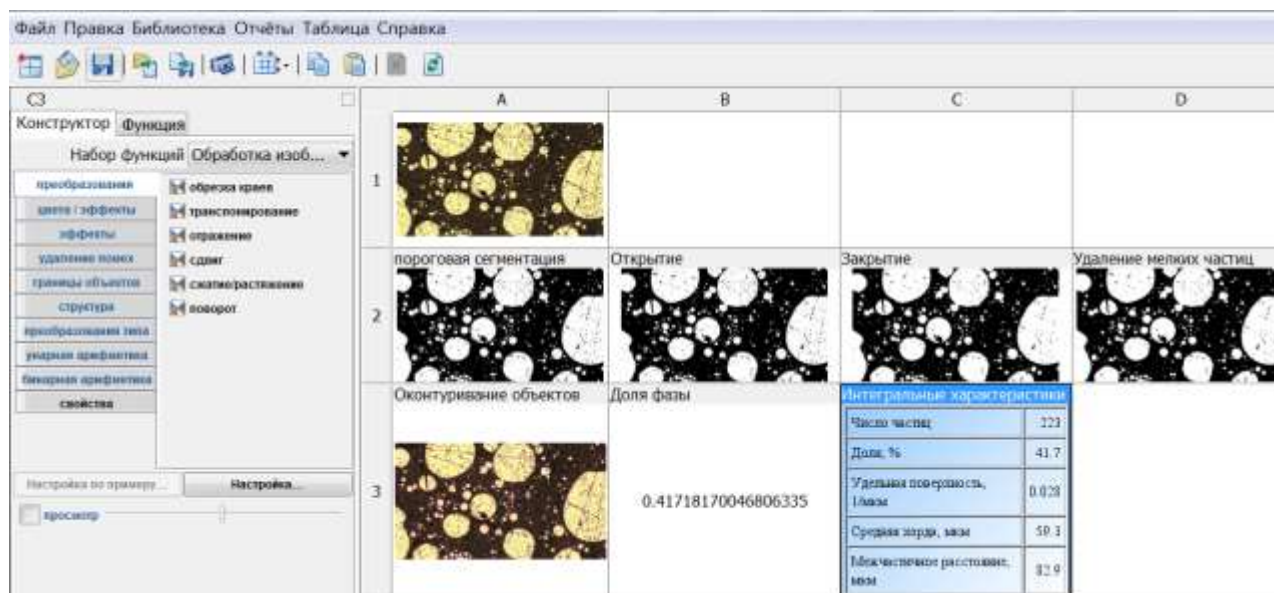


Рис. 7. Результаты обработки изображений образца шлака № 1 – характеристики включений и доля кремния в образце
 Fig. 7. Results of slag sample no. 1 image processing – inclusion characteristics and silicon proportion in the sample

ПУТИ ПЕРЕРАБОТКИ РАФИНИРОВОЧНЫХ ШЛАКОВ

В настоящее время накоплен определен-

ный опыт переработки шлаков кремниевого производства, основные предложения направлены на доизвлечение кремния или

получение продуктов, востребованных в различных отраслях.

Так, российские ученые [24] предлагают способ извлечения кремния из шлака. Шлак как составляющий шихты получен при рафинировании кремния с введением шлакообразующих компонентов (оксидов алюминия и кальция) и растворителя (железа, добавляемого в виде стружки). Данную шихту после расплавления выдерживают при температуре не ниже 1600°C, а затем охлаждают с отделением металлической фазы, представляющей собой сплав кремния и железа, от вторичного шлака следующего состава, % масс.: SiO₂ – 46,4–52,2; Al₂O₃ – 13,3–19,4; CaO – 30,2–34,54.

Авторы [25–27] предлагают синтезировать высококремнистые силумины из алюмоматричных композиций, полученных с использованием вторичного сырья, кварцевого песка и отходов производства кристаллического (технического) кремния. Для синтеза высококремнистых силуминов использовались отходы на основе алюминия, а также наполнители (формовочный кварцевый песок марки 2K2O203 и порошкообразные отходы кремния с частицами фракции 0,3–1,0 мм в количестве 10–15% от массы вводимого алюминия). В результате авторы получили литейные заэвтектические сплавы и алюмокремниевые лигатуры с содержанием кремния до 25–26%.

Авторы изобретения [28] предлагают способ сортировки шлаков кремниевого производства, основанный на сепарации составляющих шлаков. В результате доизвлекается дополнительное количество целевого продукта. Сепарацию осуществляют рентгенометрическим методом по характеристическому излучению стронция или кальция.

Предложенный способ обладает преимуществами: утилизация отвальных шлаков с извлечением дополнительного количества ценного кремния, повышение экологичности предлагаемой технологии, снижение себестоимости конечной продукции. Недостатком данного изобретения является использование процессов дробления и сортировки, требующих больших временных и финансовых затрат.

Таким образом, шлаки кремниевого производства возможно перерабатывать с целью извлечения из них кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рафинировочные шлаки кремниевого производства являются перспективным техногенным сырьем. Для изучения химического состава образцов шлаков после окислительного рафинирования с АО «Кремний» использовали рентгенофазовый, рентгенофлуоресцентный, металлографический методы исследования, а также метод сканирующей электронной микроскопии. Результаты рентгенографического исследования показали наличие в исследуемых рафинировочных шлаках кремния, карборунда, низкотемпературных кристобалита и кварца. По данным РФА в образце шлака кроме кремния содержатся, % масс.: Ca – 7,40; Al – 3,80; Fe – 0,30; Ba – 0,19; K – 0,14; Na – 0,09; Sr – 0,09; Mg – 0,08; Ti – 0,05; S – 0,02. Согласно данным химического и рентгенофазового анализов с АО «Кремний» содержание кремния в шлаках варьируется в диапазоне от 42% до 65%, что свидетельствует о перспективности переработки данного техногенного сырья для доизвлечения кремния или получения товарных кремнийсодержащих продуктов, востребованных в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Holappa L. Toward sustainability in ferroalloys production // Proceeding of the Twelfth Intern. Ferroalloys Congress (Helsinki, 6–9 June 2010). Helsinki, 2010. P. 1–10.
2. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
3. Архипов С.В., Катков О.М., Руш Е.А. [и др.]. Технология выплавки технического кремния / под ред. О.М. Каткова. Иркутск: ЗАО «Кремний», 1999. 245 с.
4. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 р.
5. Schei A., Tuset J.Kr., Tveit H. Production of High Silicon Alloys. Trondheim: Tapir, 1998. 363 p.
6. Andresen B. The metallurgical silicon process revisited

- ed // Silicon for the Chemical and Solar Industry X: Proceedings of the International Conference (Ålesund – Geiranger, 28 June – 2 July 2010). Ålesund – Geiranger: Norwegian University of Science and Technology, 2010. P. 11–23.
7. Немчинова Н.В. Поведение примесных элементов при производстве и рафинировании кремния: монография. М.: Академия естествознания, 2008. 237 с.
8. Ringdalen E. Changes in Quartz During Heating and the Possible Effects on Si Production // JOM. 2015. Vol. 67. Iss. 2. P. 484–492.
<https://doi.org/10.1007/s11837-014-1149-y>
9. Зобнин Н.Н., Байсанов С.О., Байсанов А.С., Мусин А.М. Влияние операционных аспектов процесса восстановления оксида кремния на соотношение материального и теплового потоков в рудно-термической печи // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 444–459.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-444-459>
10. Немчинова Н.В., Леонова М.С., Тютрин А.А. Экспериментальные работы по плавке окомкованной шихты в производстве кремния // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 1. С. 209–217.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-209-217>
11. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the Charge Pelletizing Parameters for Silicon Smelting Based on Technogenic Materials // Metallurgist. 2019. Vol. 63. Iss. 1-2. P. 115–122.
<https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>
12. Tesfahunegn Y.A., Magnusson T., Tangstad M., Saevarsdottir G. Effect of electrode shape on the current distribution in submerged arc furnaces for silicon production - a modelling approach // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. P. 595–600. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a6>
13. Børset M.T., Kolbeinsen L., Tveit H., Kjelstrup S. Exergy based efficiency indicators for the silicon furnace // Energy. 2015. Vol. 90. Part. 2. P. 1916–1921.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.010>
14. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Korepina N.A., Belskii S.S. On the possibility of carbonaceous dust waste use of prebaked anode production in silicon metallurgy // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 411. P. 012052.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012052>
15. Ringdalen E., Tangstad M. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions // International Smelting Technology Symposium (Incorporating the 6th Advances in Sulfide Smelting Symposium) (Orlando, 11–15 March 2012). Orlando: John Wiley & Sons, 2012. P. 195–203.
<https://doi.org/10.1002/9781118364765.ch24>
16. Vangskåsen J. Metal-producing mechanisms in the carbothermic silicon process, NTNU-Trondheim, 2012. [Электронный ресурс]. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/249099> (20.12.2020).
17. Gasik M. Handbook of ferroalloys: theory and technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 536 p.
18. Тютрин А.А., Фереферова Т.Т. Применение современных методов анализа для исследования шлаков кремниевого производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 9. С. 139–146.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-139-146>
19. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевого производства // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 31–39.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>
20. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Tyutrin A.A. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 969. P. 012038.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012038>
21. Валявин Г.Г., Запорин В.П., Габбасов Р.Г., Калимуллин Т.И. Процесс замедленного коксования и производство нефтяных коксов, специализированных по применению // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2011. № 8. С. 44–48.
22. Анисович А.Г. Современная металлография – основа литейного материаловедения // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 99–108.
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-99-108>
23. Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Металлографическое исследование образцов алюминиевых рондолей // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 124–128. [Электронный ресурс]. URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10006363 (20.12.2020).
24. Пат. № 2690877, Российская Федерация, С22В 7/04, С01В 33/06. Способ выделения металлического кремния из шлака технического кремния / И.Д. Рожихина, О.И. Нохрина, И.Е. Ходосов, А.В. Проровский, А.И. Карлина, К.С. Ёлкин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». Заявл. 27.09.2018; опубл. 06.06.2019. Бюл. № 16.
25. Арабей А.В., Рафальский И.В. Синтез алюминиево-кремниевых сплавов методом прямого восстановления кремния с использованием алюмоматричных композиционных лигатур // Литье и металлургия. 2011. № 3. С. 19–25.
26. Арабей А.В., Рафальский И.В., Немененок Б.М. Синтез сплавов системы Al-Si из алюмоматричных композиций, полученных с использованием отходов алюминия и кварцевого песка // Металл и литье Украины. 2013. № 4. С. 3–7.
27. Рафальский И.В., Арабей А.В., Немененок Б.М. Физико-химические основы синтеза силуминов с использованием кварцосодержащих материалов: монография. Минск: БНТУ, 2015. 140 с.
28. Пат. № 2209683, Российская Федерация, В03В 13/06. Способ сортировки шлаков производства кремния / П.Н. Антонов, В.А. Федосенко, Ю.О. Федоров, И.У. Кацер; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Кремний». Заявл. 29.08.2001; опубл. 10.08.2003. Бюл. № 22.

References

1. Holappa L. Toward sustainability in ferroalloys production. In: *Proceeding of the Twelfth Intern. Ferroalloys Congress*. 6–9 June 2010, Helsinki. Helsinki; 2010, p. 1–10.
2. Sizyakov VM, Vlasov AA, Bazhin VYu. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex. *Tsvetnye Metally*. 2016;1:32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
3. Katkov OM. *Smelting technology of industrial silicon*. Irkutsk: ZAO Kremniy; 1999, 244 p. (In Russ.).
4. Gasik MI, Gasik MM. *Silicon electrothermy*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine; 2011, 487 p.
5. Schei A, Tuset JK, Tveit H. *Production of high silicon alloys*. Trondheim: Tapir; 1998, 363 p.
6. Andresen B. The metallurgical silicon process revisited. In: *Silicon for the Chemical and Solar Industry X: Proceedings of the International Conference*. 28 June – 2 July 2010, Ålesund – Geiranger. Ålesund – Geiranger: Norwegian University of Science and Technology; 2010, p. 11–23.
7. Nemchinova NV. *Behavior of impurity elements in silicon production and refining*: monograph. M.: Akademiya yestestvennykh nauk; 2008, 218 p.
8. Ringdalen E. Changes in quartz during heating and the possible effects on Si production. *JOM*. 2015;67(2):484–492. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1149-y>
9. Zobnin NN, Baisanov SO, Baisanov AS, Musin AM. Effect of silicon oxide reduction operational aspects on material and heat flow ratio in ore-thermal furnace. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):444–459. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-444-459>
10. Nemchinova NV, Leonova MS, Tyutrin AA. Experimental works on pelletized charge smelting in silicon production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;1(21):209–217. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-209-217>
11. Nemchinova NV, Leonova MS, Tyutrin AA, Bel'skii SS. Optimizing the charge pelletizing parameters for silicon smelting based on technogenic materials. *Metallurgist*. 2019;63(1-2):115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>
12. Tesfahunegn YA, Magnusson T, Tangstad M, Saevarsdottir G. Effect of electrode shape on the current distribution in submerged arc furnaces for silicon production - a modelling approach. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(6):595–600.
13. Børset MT, Kolbeinsen L, Tveit H, Kjelstrup S. Exergy based efficiency indicators for the silicon furnace. *Energy*. 2015;90(2):1916–1921.
14. Nemchinova NV, Tyutrin AA, Korepina NA, Belskii SS. On the possibility of carbonaceous dust waste use of prebaked anode production in silicon metallurgy. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;411:012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012052>
15. Ringdalen E, Tangstad M. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions. In: *International Smelting Technology Symposium (Incorporating the 6th Advances in Sulfide Smelting Symposium)*. 11–15 March 2012, Orlando. Orlando: John Wiley & Sons; 2012, p. 195–203. <https://doi.org/10.1002/9781118364765.ch24>
16. Vangskåsen J. Metal-producing mechanisms in the carbothermic silicon process, NTNU-Trondheim, 2012. Available from: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/249099> zavedeniya [Accessed 20th December 2020].
17. Gasik M. *Handbook of ferroalloys: theory and technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013, 536 p.
18. Tyutrin AA, Fereferova TT. Using modern analysis methods to study silicon production slags. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):139–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-139-146>
19. Nemchinova NV, Buzikova TA. Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):31–39. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>
20. Nemchinova NV, Hoang VV, Tyutrin AA. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;969:012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012038>
21. Valyavin GG, Zaporin VP, Gabbasov RG. Delayed coking process and specialized petroleum coke production. *Territorija "NEFTEGAS" = Oil and Gas Territory*. 2011;8:44–48.
22. Anisovich AG. Modern metallography – the basis of foundry material science. *Litiya i Metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. 2019;2:99–108. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-99-108>
23. Nemchinova NV, Tyutrin AA. Metallographic investigation of aluminum rondol samples. *Fundamental'nyye issledovaniya = Fundamental research*. 2015;3:124–128. Available from: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10006363 [Accessed 20th December 2020].
24. Rozhikhina ID, Nokhrina OI, Khodosov IE, Prorovskij AV, Karlina AI, Elkin KS. *Method of extracting metallic silicon from technical grade slag*. Patent RF, no. 2690877; 2019. (In Russ.).
25. Arabei AV, Rafalski IV. Synthesis of aluminium-siliceous alloys by means of silicon direct revivification using of alumina-matrix composition alloys. *Litiya i Metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. 2011;3:19–25.
26. Arabei AV, Rafalski IV, Nemenenok BM. The synthesis of alloys of system Al-Si of aluminium-matrix composites on the basis from waste aluminum and quartz materials. *Metall i lit'ye Ukrainy = Metal and casting of Ukraine*. 2013;4(239):3–7.

27. Rafalski IV, Arabei AV, Nemenenok BM. *Physico-chemical foundations of silumin synthesis using quartz-containing materials: monograph*. Minsk: BNTU; 2015, 140 p.

28. Antonov PN, Fedosenko VA, Fedorov YuO, Katser IU. *Sorting method for silicon production slags*. Patent RF, no. 2209683; 2003. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Немчинова Нина Владимировна,
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой металлургии цветных
металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: ninavn@yandex.ru

Хоанг Ван Виен,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: hoangvanvien01121994@mail.ru

Апончук Ирина Игоревна,
старший преподаватель,
кафедра рекламы и журналистики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: aponchuk55@inbox.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 12.12.2020; одобрена после рецензирования 11.01.2021; принята к публикации 29.04.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nina V. Nemchinova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous Metals
Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: ninavn@yandex.ru

Vien V. Hoang,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: hoangvanvien01121994@mail.ru

Irina I. Aponchuk,
Senior Lecturer,
Department of Advertising and Journalism,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: aponchuk55@inbox.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

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

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

Information about the article

The article was submitted 12.12.2020; approved after reviewing 11.01.2021; accepted for publication 29.04.2021.

Повышение эффективности карботермического восстановления красного шлама при обработке микроволнами

© А.А. Халифа*, В.Ю. Бажин*, М.Э.-М. Х. Шалаби**, А. Абдельмонеим***, М. Омран***

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

**Центральный научно-исследовательский металлургический институт, г. Каир, Египет

***Университет Оулу, г. Оулу, Финляндия

Резюме: Целью работы явилось изучение влияния микроволновой обработки брикетов, состоящих из красного шлама с содержанием более 48% Fe, на процессы восстановления железа при различных условиях термообработки. Объектом исследований явились образцы красного шлама, образующегося при получении глинозема из бокситов на Уральском алюминиевом заводе. Исследование химического состава образцов шлама проводили с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Состав исходного шлама и полученных агломератов после обработки в микроволновой и муфельной печах изучали рентгеноструктурным методом. Фазовые переходы и структурные изменения в ходе нагрева образцов исследовали при помощи сканирующей электронной микроскопии. Экспериментальные брикеты, состоящие из красного шлама и древесного угля, подвергались обработке при 850°C и 1000°C в микроволновой печи (с частотой 2,45 ГГц и мощностью 900 В). Для сравнения брикеты аналогичного состава термообработывались в муфельной печи при тех же условиях. Установлено, что при микроволновом нагреве до 1000°C в течение 10 мин гематит полностью восстанавливается до металлического железа при добавлении вюстита. Анализ микроструктуры образцов после микроволновой обработки показал, что частицы металлического железа в образующихся окатышах-агломератах имеют больший размер, чем в образцах после традиционного термонагрева в муфельной печи. Металлизированные фазы восстановленного железа в конце термообработки в микроволновой печи создают устойчивый прочный каркас агломератов. Научно обоснованные параметры процесса могут стать основой создания технологии переработки красного шлама, являющегося техногенным сырьем. Полученные высокопрочные окатыши из красного шлама с содержанием восстановленного железа (до 85%) могут стать альтернативным шихтовым материалом для черной металлургии. Внедрение предлагаемой технологии переработки красного шлама в окатыши-агломераты, востребованной в различных отраслях промышленности, позволит снизить экологическую нагрузку на производственные территории глиноземного производства.

Ключевые слова: красный шлам, микроволновое излучение, древесный уголь, гематит, карботермическое восстановление

Благодарности: Исследовательской металлургической группе технологического факультета Университет Оулу (Финляндия) и Министерству науки и культуры (Египет) за финансовую поддержку на выполнение данной исследовательской работы.

Для цитирования: Халифа А.А., Бажин В.Ю., Шалаби М.Э.-М.Х., Абдельмонеим А., Омран М. Повышение эффективности карботермического восстановления красного шлама при обработке микроволнами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 2. С. 264–279. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-264-279>

Improving the efficiency of the carbothermal reduction of red mud by microwave treatment

Ahmed A. Khalifa*, Vladimir Yu. Bazhin*, Mohammed E.-M.H. Shalabi**,
Ahmed Abdelmoneim***, Mamdouh Omran***

*St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

**Central Metallurgical Research Institute, Cairo, Egypt

***University of Oulu, Oulu, Finland

Abstract: In this work, we studied the effect of microwave treatment of red mud briquettes containing more than 48% of Fe on the process of iron reduction under various conditions of heat treatment. Research samples were collected from

red mud formed during the production of alumina from bauxite at the Ural Aluminum Smelter. The chemical composition of mud samples was examined by X-ray fluorescence analysis. The composition of initial mud and that of agglomerates obtained after treatment in microwave and muffle furnaces was studied using the X-ray diffraction method. Phase transitions and structural changes occurring under the effect of heating were studied by scanning electron microscopy. The experimental briquettes comprising red mud and charcoal were treated at 850°C and 1000°C in a microwave furnace (under the frequency of 2.45 GHz and the power of 900 W). For reference, briquettes of analogous composition were heat-treated in a muffle furnace under the same conditions. It was found that, under the conditions of microwave heating to 1000°C for 10 min, hematite is completely reduced to metallic iron after the addition of wustite. An analysis of the microstructure of the samples after microwave treatment showed that the particles of metallic iron in the as-obtained pellet-agglomerates have a larger size than in those after conventional thermal heating in a muffle furnace. The metallized phases of reduced iron at the end of heat treatment in a microwave furnace create a stable durable body of agglomerates. The evidence-based parameters of the process can become a basis for designing a technology for recycling such an industrial material as red mud. The obtained high-strength pellets from red mud with a high content of reduced iron (up to 85%) may be used as an alternative charge material for ferrous metallurgy. The proposed technology for recycling red mud into pellet-agglomerates can be applied in various industries to reduce environmental impact on the production areas of alumina plants.

Keywords: red mud, microwave radiation, charcoal, hematite, carbothermic reduction

Acknowledgements: we are grateful to the Process Metallurgy Research Group of the Technology Faculty of the University of Oulu (Finland) and the Cultural Affairs and Mission Sector (Egypt) for their financial support for performing the present research work.

For citation: Khalifa AA, Bazhin VYu, Shalabi E-MH, Abdelmoneim A, Omran M. Improving the efficiency of the carbothermal reduction of red mud by microwave treatment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(2):264–279. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-264-279>

ВВЕДЕНИЕ

Красный шлам (КШ), получаемый в глиноземном производстве по технологии Байера, представляет собой техногенное сырье с различным содержанием оксидов и сложных многокомпонентных соединений, включающих в себя более 40 различных элементов [1–5]. На каждую 1 т произведенного глинозема образуется ≈0,8–0,9 т КШ. По оценке специалистов и технологов, в мире ежегодно образуется более 120 млн т этих отходов [6]. На российских предприятиях ОК «РУСАЛ», находящихся на Урале (Богословский алюминиевый завод (БАЗ) и Уральский алюминиевый завод (УАЗ)), образуется ≈ 5–8 т КШ, и в настоящее время ≈ 600 млн т уже хранится на открытых шламовых полях [7], в том числе в г. Бокситогорск (Ленинградская обл.) и г. Краснотурьинск (Свердловская обл.) в виде государственного сырьевого актива.

Большой объем шламовых полей, высокая щелочность шламов (рН = 10–13) и проблемы с хранением их в дамбах представляют собой техногенную опасность и влияют на загрязнение окружающей среды в целом [3, 8, 9]. Такой объем отходов 1 категории в России, а также в тех странах, где имеются

бокситы (Бразилия, Ямайка, Гвинея, Австралия, Германия, Франция), при переработке которых образуются огромные техногенные хранилища, по-прежнему является одной из самых серьезных мировых проблем для устойчивого развития и горноперерабатывающей и металлургической промышленности [10, 11].

В течение многих лет специалисты алюминиевой промышленности стремились снизить негативное воздействие на окружающую среду образующегося КШ. Существует множество технических и технологических решений по переработке КШ в продукцию различного назначения, но они не внедрены в производство, что способствовало бы уменьшению объемов хранения отходов [9, 12, 13]. Так, некоторые полигоны и шламовые поля находятся в состоянии консервации более 50 лет, и при этом под воздействием внешней среды и осадков изменяется химический состав отходов. Часть соединений попадает в грунтовые и подземные воды, а некоторые испаряются с поверхности. Несмотря на это, содержание железосодержащих фаз даже на старых хранилищах остается на уровне 40–60% [6, 14]. Принимая во внимание эти глобальные эколо-

гические опасности и высокий уровень затрат на долгосрочное хранение, необходимы разработки технологий переработки КШ в различную продукцию или шихтовые материалы для черной металлургии [15].

Высокое содержание оксидов железа в КШ, наряду с группой редкоземельных элементов, может представлять интерес для комплексной переработки данного техногенного сырья производства глинозема [8]. Кроме этого, в производстве чугуна и стали наблюдаются тенденции утилизации более дешевых топливных отходов и железосодержащих материалов и использовании их в качестве оборотного шихтового сырья [16–18]. Существует несколько апробированных технологий для извлечения железа из красного шлама [17, 19–26]: высокоинтенсивная магнитная сепарация, контролируемое газовое восстановление водородом, карботермическое восстановление, восстановительное спекание с солями натрия при высокой температуре, плавка в плазменном реакторе с удлиненной дугой, выщелачивание щавелевой кислотой и др.

Традиционные методы обработки материалов, основанные на выделении тепла экзотермических реакций, в значительной степени зависят от эффективной теплопередачи между ее источниками при взаимодействии с перерабатываемыми материалами [27].

Таким образом, проведенный анализ показал, что технологические ограничения традиционных термических методов требуют разработки новых технологий для эффективной переработки КШ. В то же время любой инновационный процесс должен быть достаточно быстрым и эффективным, чтобы удовлетворять требованиям низкой себестоимости и малых энергозатрат. Технологии микроволновой обработки материалов – одно из таких решений, которое предлагает значительную экономию времени и, следовательно, является рентабельным. Кроме этого, такие методы являются экологически безопасными. Данные технологии в металлургии носят междисциплинарный характер, применяются сравнительно недавно и могут быть успешно реализованы для различных материалов [27–35].

В 2015 г. С. Сингх, Д. Гупта, В. Жаин, А.К. Шарма в своей работе [27] представили состояние и тенденции микроволновой обработки материалов в целом, а Агравал [36] описал последние достижения в области обработки материалов с использованием микроволнового воздействия более подробно. Авторы обратили внимание на возможность реализации этих процессов во время плавки, так как при использовании микроволновой обработки выбросы CO_2 можно сократить на 50% по сравнению с традиционными способами.

Как правило, при нагреве процесс начинается с восстановления гематита до магнетита, затем магнетит восстанавливается до вюстита, и в результате до металлического железа. Известны реакции [37], которые происходят на каждом этапе фазового перехода:

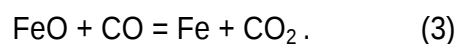
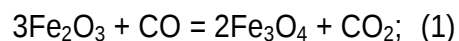


Диаграмма Эллингема [38], показанная на рис. 1, представляет собой зависимость между изменениями стандартной свободной энергии Гиббса при образовании различных оксидов и температурой. Эта диаграмма полезна для сравнения степени устойчивости различных оксидов при определении рациональных температурных режимов разрабатываемой технологии. Очевидно, что оксиды железа постепенно восстанавливаются до гематита, магнетита, вюстита и металлического железа.

В последнее время многие исследователи изучали процесс микроволнового нагрева как альтернативу переработке различных промышленных отходов (окалина, шлак, пыль, шлам и т.д.) с целью извлечения полезных элементов (Fe, Zn, Al, Mg и редкоземельных металлов) [16, 17]. Поэтому в некоторых исследованиях изучается восстановление железа из отходов с помощью прямого микроволнового нагрева порошкового материала. Например, М. Омран, Т. Фабритиус и другие исследователи [32] анализировали

влияние микроволн на переработку шлаков доменных печей без добавления восстановителя с использованием нагрева с частотой волн 2,45 ГГц при мощности 900 Вт при различной продолжительности воздействия. По мнению авторов, гематит полностью восстанавливается до металлического железа. Исследование также подтвердило, что материалы с железосодержащими фазами можно обрабатывать и перерабатывать с помощью микроволнового нагрева с получением агломератов.

Стоит также упомянуть недавний научный отчет С. Агравали и его соавторов [17], в котором изучалась система «красный шлам – древесный уголь 10 масс. %» в режиме микроволнового восстановления в течение 50 мин при 1000°C. Определены оптимальные условия восстановления железосодержащих фаз, которые при 850–870°C составляли 800 Вт и 2,45 ГГц при продолжительности выдержки 30 мин. В результате на выходе получали обогащенный железом концентрат,

содержащий магнетит в качестве основной железосодержащей фазы с содержанием железа 46,5 масс. %. Степень извлечения железа составила 94,3%. Таким образом, данный подход может быть использован в альтернативных технологиях производства чугуна.

Целью экспериментов явилось изучение роли увеличения скорости реакции сверхвысокочастотной обработки и исследования эффективного восстановления красного шлама с помощью микроволнового нагрева. Химический состав полученных с использованием микроволнового нагрева агломератов был проанализирован с помощью рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии (SEM от англ. «scanning election microscopy»), чтобы определить влияние типов нагрева на структуру восстановленного КШ. Также для сравнения проводились эксперименты по восстановлению КШ при обычном нагревании.

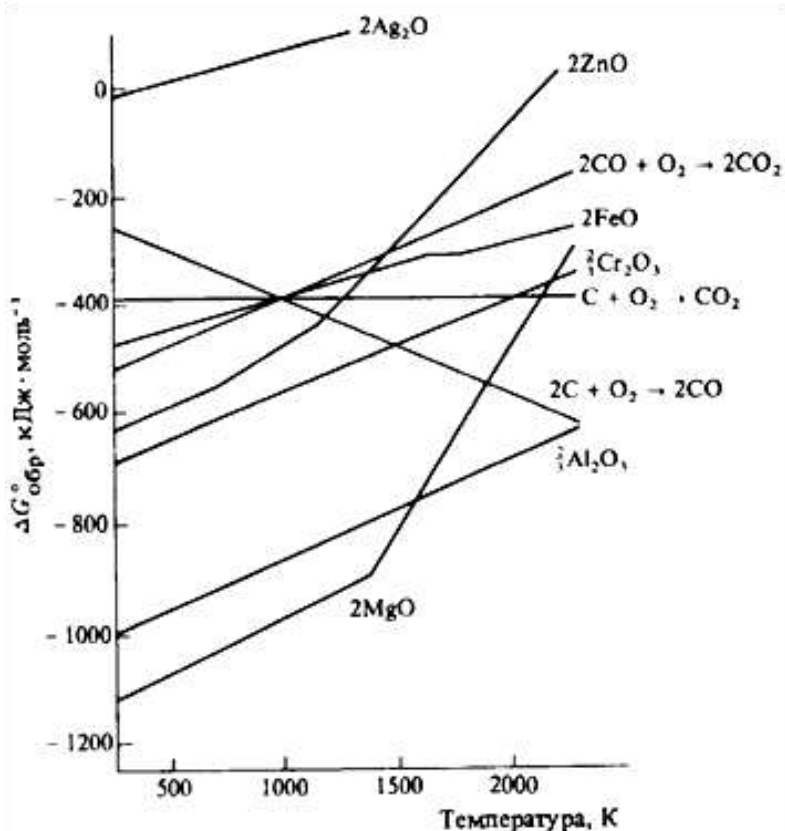


Рис. 1. Диаграмма Эллингема для различных оксидов
 Fig. 1. Ellingham diagram for different oxides

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментов использовали КШ Уральского алюминиевого завода, работающего на привозных бокситах различных потребителей. Но основным сырьем являются бокситы Североуральского бокситового рудника. Твердый остаток бокситов после процесса извлечения из них глинозема имеет крупность частиц преимущественно 0,063–0,072 мм. Из процесса он выводится в виде пульпы с отношением жидкого к твердому от 3 до 5. Для проведения экспериментов отбирали свежий КШ и высушивали его.

Химический состав исходного образца КШ приведен в табл. 1.

Содержание железосодержащих фаз сохраняется на среднестатистическом уровне.

Для исследований в смесителе предварительно подготавливали образцы окатышей в виде смеси КШ с различным соотношением древесного угля, шихту перемешивали в лабораторном смесителе. Далее образцы

«красный шлам – древесный уголь» помещали в тигель и подслоем кварцевого песка нагревали со скоростью 5–6°С/мин, выдерживали в муфельной печи в интервале от 850°С до 1200°С в течение 2 ч, а затем полученный агломерат охлаждали в газовой камере для предотвращения повторного окисления восстановленных образцов КШ.

На рис. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа образца красного шлама УАЗа. Видно, что основными соединениями являются гематит (Fe_2O_3), ангидрит (CaSO_4), диопсид ($\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$), кварц (SiO_2) и кальцит (CaCO_3).

Образцы в виде окатышей нагревали в различных условиях при разном соотношении красного шлама и угля (табл. 2), и по окончании нагрева получали агломерат.

Микроволновая печь состоит из генератора с двумя магнитронами (с рабочей частотой 2,45 ГГц и генерируемой мощностью 900 Вт), направляющих труб, панели управления,

Таблица 1. Химический состав образца красного шлама

Table 1. Chemical composition of the red mud sample

Содержание компонентов, масс. %	Fe_2O_3	Na_2O	SiO_2	CaO	Al_2O_3	P_2O_5	TiO_2	MgO	SO_3	K_2O	MnO	Sc
Красный шлам	48,26	3,35	8,13	10,98	19,17	1,16	5,51	1,06	0,99	0,11	0,34	0,01

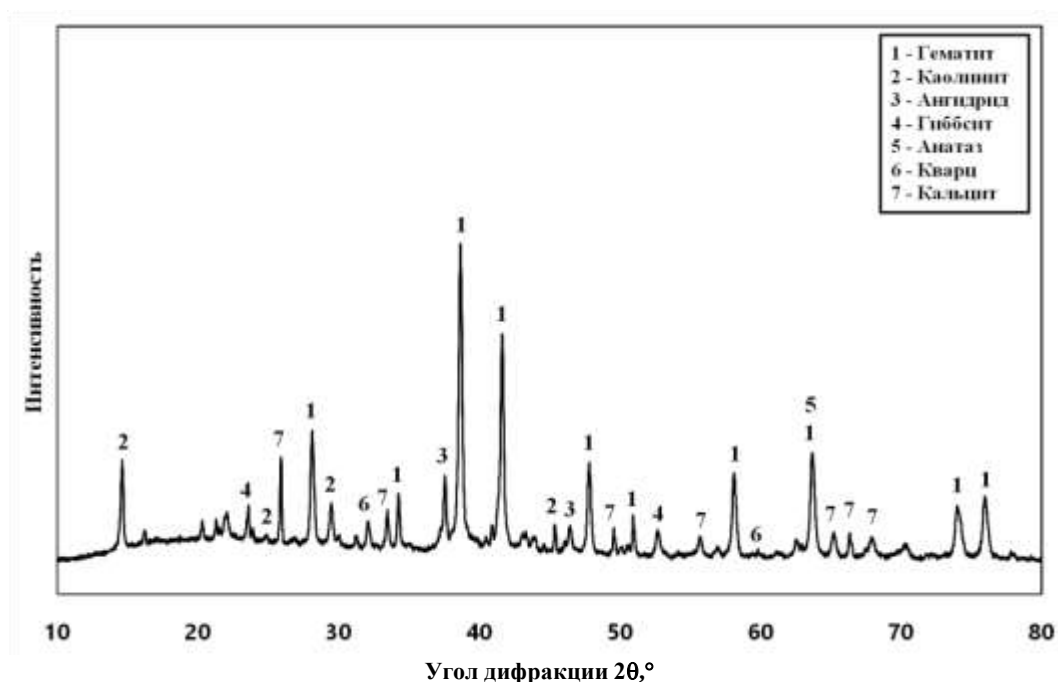


Рис. 2. Фазовый состав образца красного шлама Уральского алюминиевого завода

Fig. 2. Phase composition of a red mud sample from the Ural aluminum smelter

Таблица 2. Характеристики образцов смеси красного шлама и угля
Table 2. Characteristics of red mud and coal mixture samples

Образцы	Содержание в шихте, %		Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, мин
	красный шлам	древесный уголь		
C1	70	29	850	10
C2	70	29	1000	10

термопары и аппликатора. Через цилиндрическое отверстие на поверхности печи термопара вставляется в центр образца для контроля температуры с помощью цифрового дисплея. В каждом эксперименте образцы окатышей располагались по оси вдоль рабочего контура печи (размер камеры составлял 513 мм × 482 мм × 310 мм), а нагревались по заданному режиму в нормальных атмосферных условиях. Эксперименты проводились при разной температуре в течение 10 мин. Затем образцы охлаждали в рабочей зоне микроволновой печи до комнатной температуры и далее помещали в эксикаторы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроволновая энергия имеет высокий уровень диссипации и быстро рассеивается по всему объему материала, нагревая его (в отличие от прямого нагрева излучением). В результате обработки образцов в микроволновой печи обнаружена неравномерность структуры полученного агломерата, поскольку

ку способность поглощения микроволн различных минеральных фаз в КШ различна, а при микроволновом излучении разница температур при взаимодействии между различными фазами быстро увеличивается. В результате нагрева образец агломерировался, как показано на рис. 3.

Можно предположить, что энергия фазовых переходов оксидов железа КШ действует как тепловой ресурс микроволнового нагрева. Мелкодисперсный образец КШ показал очень хорошую чувствительность к микроволновому нагреву, потому что он содержит основные оксиды минералов, которые подвергаются микроволновому воздействию. Причина может заключаться в том, что режим микроволнового нагрева обеспечивает равномерный нагрев всей массы образца. Это означает, что полярные частицы в образце КШ, подвергаемом микроволновой обработке, нагреваются внутри и снаружи материала одновременно.

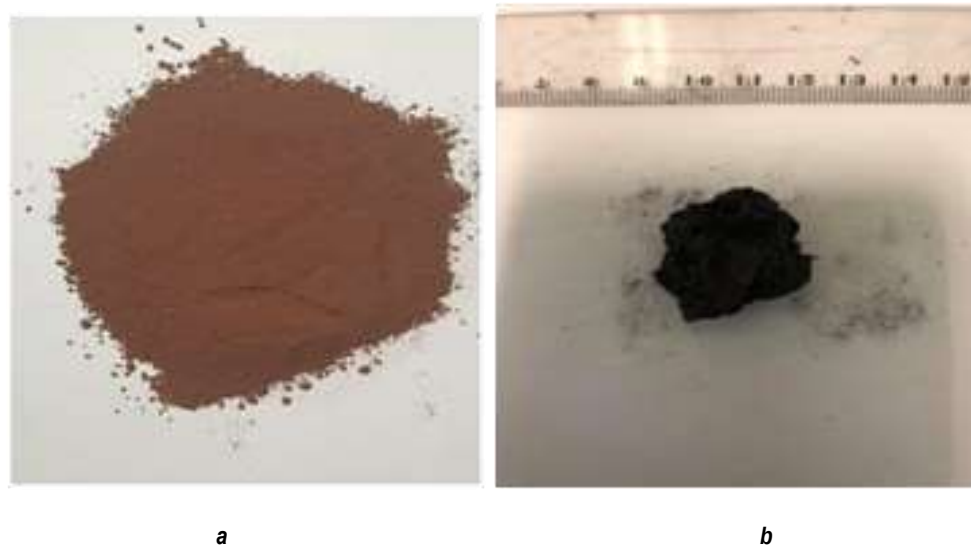


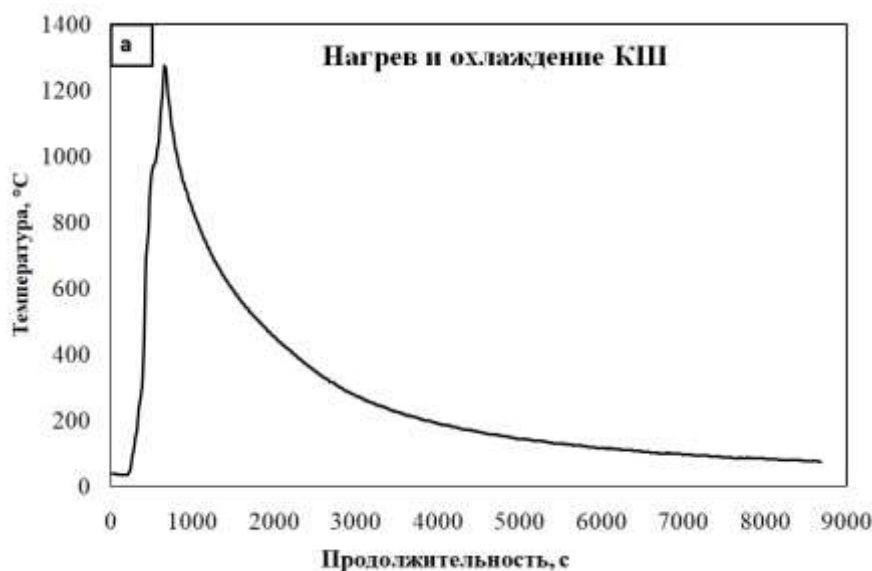
Рис. 3. Агломерация красного шлама при нагреве с древесным углем:
 а – исходный образец красного шлама; б – после 10 мин микроволнового нагрева
Fig. 3. Red mud agglomeration when heated with charcoal:
 а – the initial sample of red mud; б – after 10 min of microwave heating

На рис. 4 показан профиль нагрева образца КШ массой 30, полученного при микроволновой мощности 4 кВт и при продолжительности воздействия 10 мин.

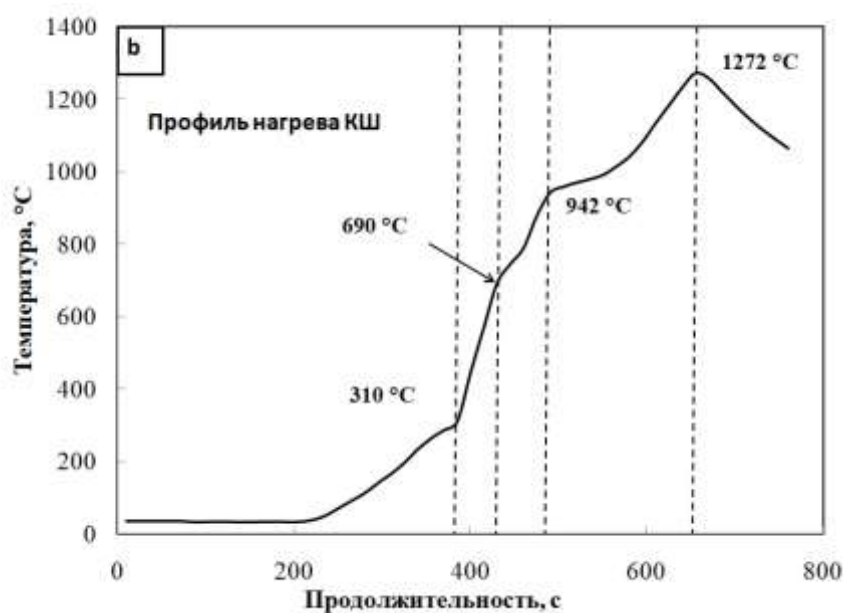
Установлено, что на скорость нагрева образца КШ влияет множество факторов, в том числе и его исходный химический состав, поскольку различные минеральные формы влияют на диэлектрические свойства красного шлама.

Процесс агломерации в объеме образца

проходит неравномерно, поскольку КШ содержит в своем составе активные материалы для микроволнового нагрева – Fe_2O_3 , TiO_2 . Также в КШ имеются и некоторые тугоплавкие оксиды, которые обладают плохой чувствительностью к микроволновому воздействию (Al_2O_3 , MgO , SiO_2 и CaO). На первых этапах нагрева до 1000°C уже через 6 мин частички красного шлама начинают спекаться из-за фазового перехода гематита [39].



a



b

Рис. 4. Профиль микроволнового нагрева образца красного шлама: а – нагрев и охлаждение; б – профиль нагрева
Fig. 4. Microwave heating profile of the red mud sample: a – heating and cooling; b – heating profile

Можно наблюдать несколько этапов изменения профиля кривой микроволнового нагрева образца КШ. Когда температура исследуемого образца достигла 310°C за 310 с, то начинается интенсивное испарение внешней влаги, поскольку даже адсорбированная на поверхности частиц КШ вода в результате разложения гиббсита удаляется при этой же температуре. Далее наблюдается резкий скачок температуры, который возникает под воздействием микроволнового излучения (достижение температуры 690°C за 430 с), что говорит о том, что на этой стадии происходит термическое разложение каолинита. В интервале температур от 690°C до 942°C процессы связаны в основном с разложением карбоната кальция (кальцита). Необходимо отметить важный момент: поскольку CaCO_3 имеет низкую чувствительность к микроволновому излучению, то при дальнейшем повышении температуры в образце он практически не разлагается. Но обнаружено, что когда температура достигла максимального значения 1272°C на 655-й секунде, происходит образование диопсида $\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$. Таким образом, в результате всех процессов после 10 мин микроволнового нагрева образуется спеченный КШ в виде агломерата. На рис. 5

приведены результаты рентгенофазового анализа исходного образца КШ и после микроволнового нагрева в течение 10 мин. Как видно из рис. 5, некоторые соединения термически разлагаются, например, каолинит, анатаз и гиббсит.

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА

Для дальнейшего понимания механизма процессов восстановления во время фазовых переходов от гематита до элементарного железа в образцах КШ был проведен термодинамический анализ. Поскольку основным соединением в КШ является гематит, то реакции с гематитом можно классифицировать как прямое восстановление или переходное состояние. Уравнения прямых фазовых переходов представлены в виде комплекса реакций (где s – твердый, от англ. «solid»; g – газообразный, от англ. «gas»):

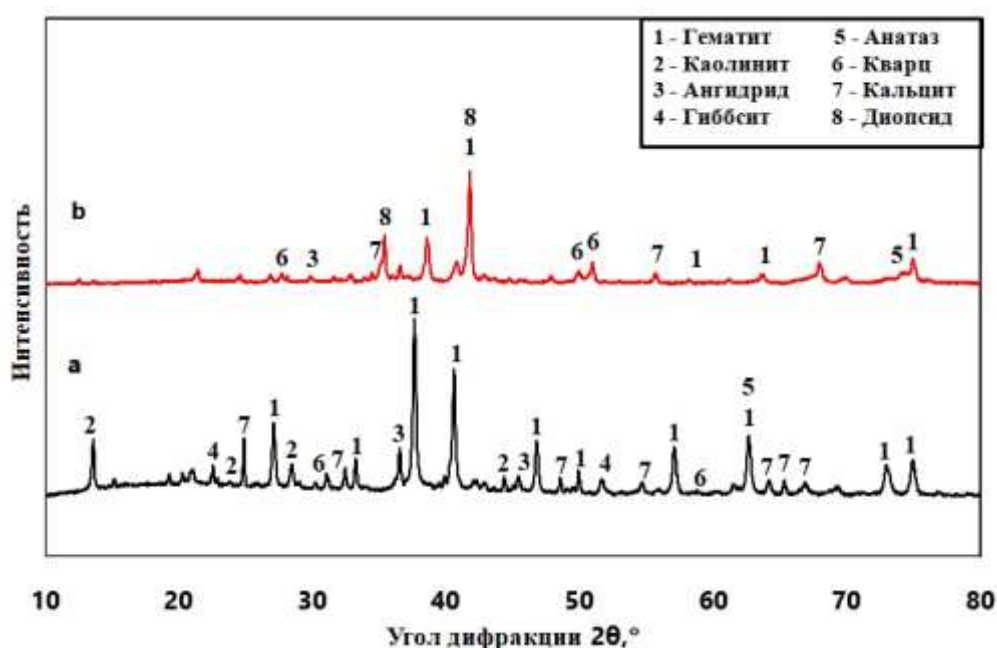
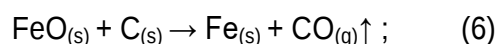
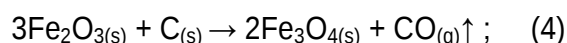
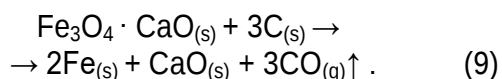
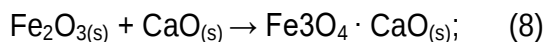
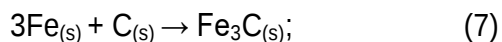
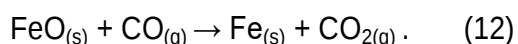
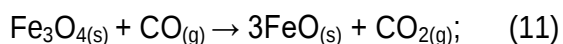
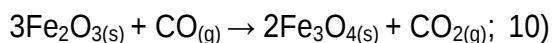


Рис. 5. Рентгенограммы образцов красного шлама: а – исходного; б – после 10 мин микроволнового нагрева
 Fig. 5. X-ray diffraction patterns of the red mud samples: a – initial; b – after 10 min of microwave heating



Побочные этапы восстановления оксидов железа следующие:



Результаты исследования образцов красного шлама в смеси с древесным углем с использованием традиционного прямого нагрева в муфельной печи, полученные при различных температурах, представлены на рентгенограммах. Было установлено, что пики, соответствующие полностью восстановленной фазе железа, усиливались при повышении температуры от 850°C до 1250°C. Между тем переход гематита в другую фазовую форму происходит до 800°C, что свидетельствует о неполном восстановлении гематита до магнетита. С другой стороны, магнетит и вюстит легко образуются при 1250°C.

Результаты исследования образцов красного шлама в смеси с древесным углем с использованием микроволновой печи показали несколько другие результаты фазовых переходов в отличие от традиционного карботермического восстановления. Так, уже при температуре восстановления 850°C гематит сразу превращается в магнетит. Восстановленные фазы исследуемых образцов КШ при температуре 1000°C после 10-минутного воздействия микроволн представлены в основном металлической фазой железа и некоторым количеством вюстита, ангидрита (CaSO_4), каолинита, синего браунмиллерита ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$), кальцита и кварца (рис. 6).

Проведенный рентгеноструктурный анализ образцов после микроволнового нагрева указывает на то, что после 10 мин процесса степень восстановления частиц железа повышается (рис. 7). При этом размер некото-

рых зерен железа в частицах более значителен, что, по всей видимости, связано с процессом полного восстановления железа и срастанием частиц, которые создают устойчивый прочный каркас образца с включениями стекловидных фаз в порах. Морфология пористой структуры указывает на диффузионный массоперенос кислорода за счет взаимодействия с древесным углем с образованием оксида углерода. Разный контраст изображения предполагает наличие дисперсной и взаимосвязанной структуры восстановленных фаз. Элементные Si, Ca, Ti и Al связаны с вновь образованной фазой металлического железа на основе твердофазной реакции при обычных условиях, как показано в спектре А (рис. 7 а).

SEM-EDS (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия от англ. «energy dispersive x-ray spectroscopy») анализ восстановленного образца КШ с использованием микроволнового нагрева показан на рис. 7, где образуется металлическое железо и фиксируется как совокупность частиц неправильной формы, беспорядочно связанных друг с другом в виде небольших агломератов. На рис. 8 представлены микроструктуры некоторых элементов, после восстановления оксидов в условиях микроволнового нагрева, находящихся в красном шламе в смеси с древесным углем.

Анализ карт элементов указывает на то, что силикат натрия, карбонат алюминия и каолиновая фаза содержат множество и других элементов (Na, Ca и Ti, K, Mn и Fe среди других) в виде мелких рассеянных зерен. Именно они и представляют стекловидную фазу в теле агломерата и тем самым повышают его прочность. Анализ микроструктуры образцов при микроволновом излучении показал, что частицы металлического железа имеют больший размер, чем те, которые были получены при прямом нагреве в муфельной печи.

В результате проведенных исследований мы получили железосодержащие продукты, которые могут стать альтернативным сырьем в производстве чугуна и стали, что соответствует концепции развития минерально-сырьевого комплекса России [40, 41].

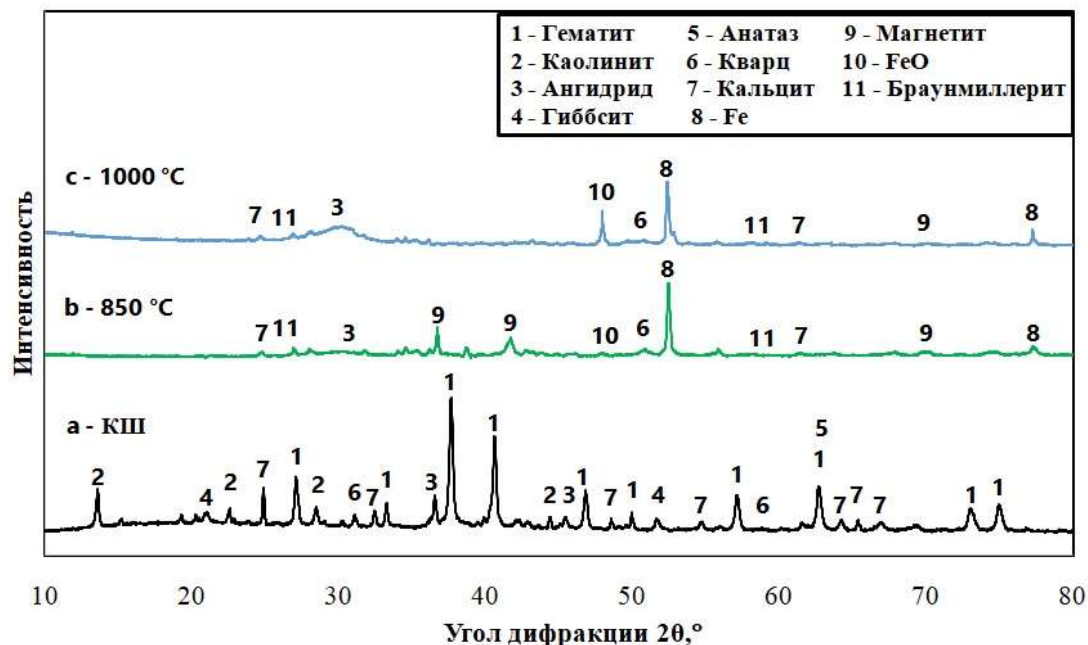


Рис. 6. Рентгенограммы образцов восстановленного древесным углем красного шлама с использованием микроволнового нагрева: а – без обработки; б – при 850°C; в – при 1000°C
 Fig. 6. X-ray diffraction patterns of the red mud samples reduced by charcoal under microwave heating: а – without treatment; б – at 850°C; в – at 1000°C

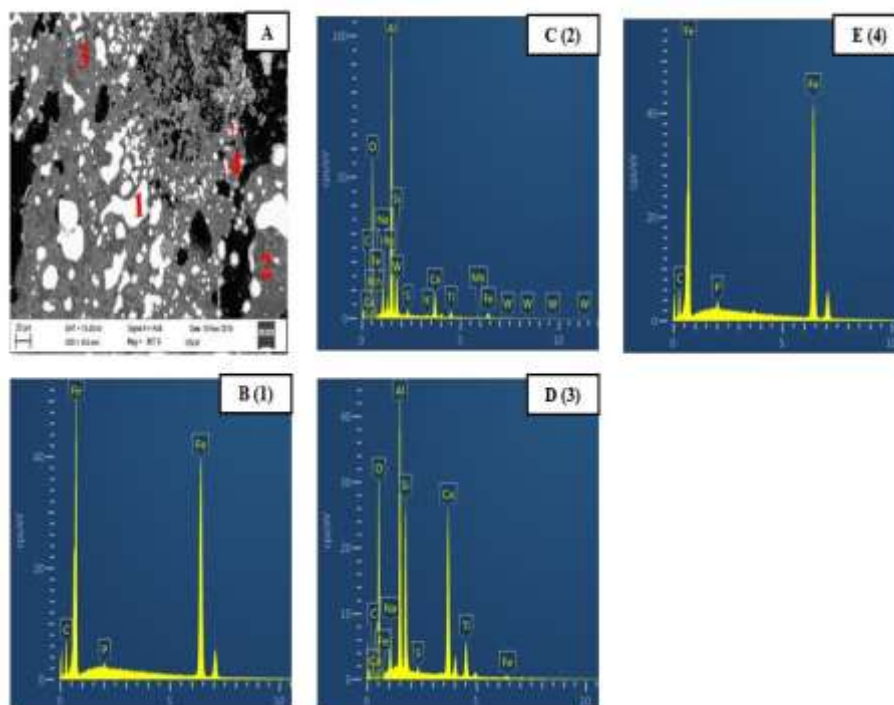


Рис. 7. (А) – Сканирующая электронная микроскопия изображения восстановленных оксидов железа в красном шламе; В (1) – энергодисперсионный рентгеноспектрокопийный анализ точки 1 в А; С (2) – энергодисперсионный рентгеноспектрокопийный анализ точки 2 в А; D (3) – энергодисперсионный рентгеноспектрокопийный анализ точки 3 в А; E (4) – энергодисперсионный рентгеноспектрокопийный анализ точки 4 в А
 Fig. 7. (A) – Scanning electron microscopy of the image of reduced iron oxides in red mud; B (1) – energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of the point 1 in A; C (2) – energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of the point 2 in A; D (3) – energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of the point 3 in A; E (4) – energy-dispersive X-ray spectroscopy analysis of the point 4 in A

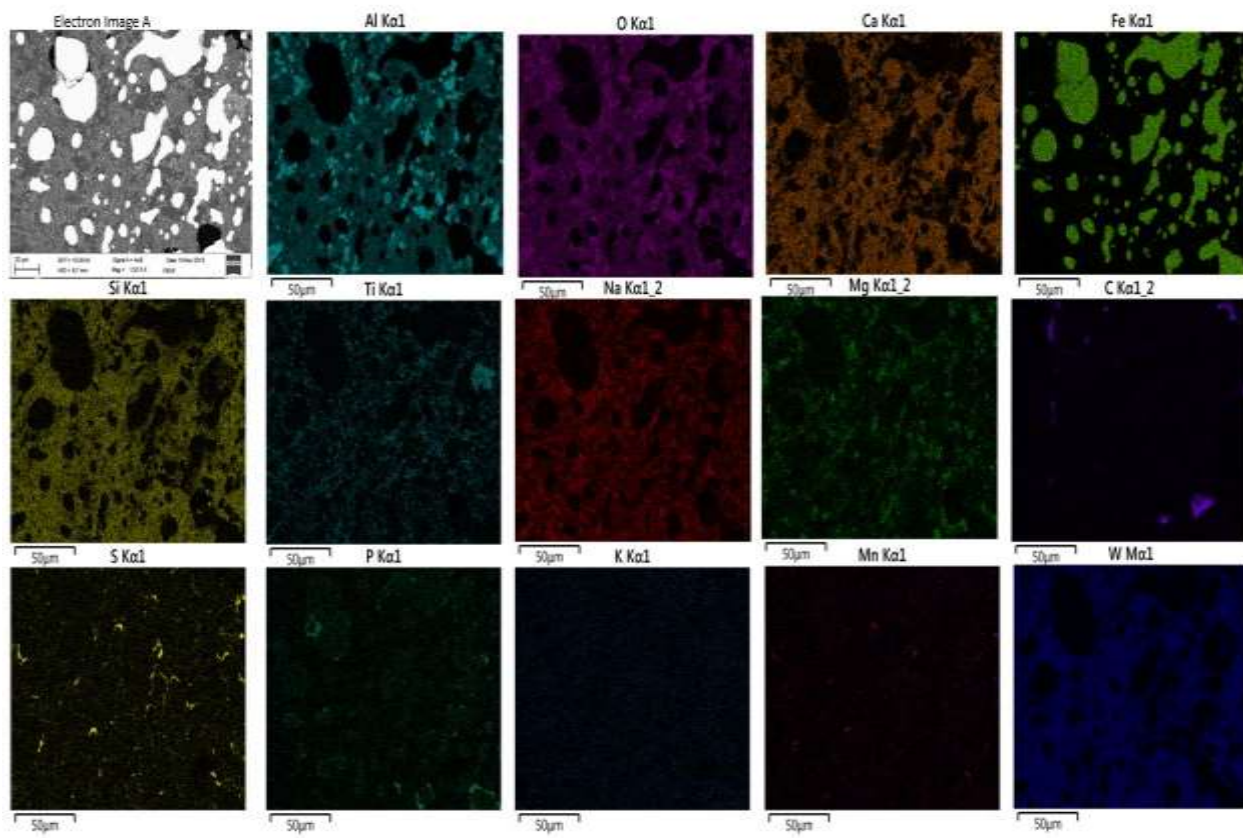


Рис. 8. Карты элементов в образцах красного шлама восстановленного древесным углем с использованием микроволнового нагрева

Fig. 8. Element maps in red mud samples reduced by charcoal under microwave heating

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно обоснован новый подход для переработки красного шлама с получением прочных агломератов под воздействием микроволнового нагрева. Применение микроволн и равномерный прогрев по всему объему образцов указывают на протекание диффузионных процессов, которые интенсифицируют фазовые переходы от гематита до частиц восстановленного железа. Экспериментальные результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

- микроволновая обработка шихты из красного шлама с древесным углем повышает эффективность процесса и снижает продолжительность фазовых переходов, что дает преимущество перед обычными восстановительными методами, обеспечивая значительное повышение содержания железа (до 80%) при меньших затратах энергии, сокращении времени выдержки и снижении температуры процесса;

- анализ микроструктуры и морфологии частиц указывает на то, что зерна железа в результате микроволнового нагрева при 1000°C распространяются и располагаются по всему объему образца более равномерно, и их размер значительно больше, чем у агломератов, полученных при традиционной технологии восстановления при той же температуре.

В результате микроволновой обработки получаются более прочные агломераты с частицами восстановленного железа, которые создают каркас с включениями стекловидных фаз.

Новый подход к обработке техногенных продуктов (красного шлама) создает предпосылки для корректировки существующих технологий производства железорудных агломератов и агломератов из красного шлама, которые могут стать составляющими в шихте для проведения доменной плавки.

Список литературы

1. Халифа А.А., Утков В.А., Бричкин В.Н. Влияние красного шлама на предотвращение полиморфизма двухкальциевого силиката и саморазрушение агломерата // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1. С. 231–240. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-231-240>
2. Бричкин В.Н., Дубовиков О.А., Николаева Н.В., Беседин А.А. Обезвоживание красного шлама и основные направления его переработки // Обогащение руд. 2014. № 1. С. 44–48.
3. Беседин А.А., Утков В.А., Бричкин В.Н., Сизяков В.М. Агломерационное спекание красных шламов // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 28–31.
4. Piirainen V.Y., Boeva A.A., Nikitina T.Y. Application of new materials for red mud immobilization // Key Engineering Materials. 2020. № 854. P. 182–188.
5. Трушко В.Л., Дашко Р.Э., Кусков В.Б., Клямко А.С. Технология «холодного» брикетирования богатых руд Яковлевского месторождения // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 133–137.
6. Akcil A., Akhmediyeva N., Abdulvaliyev R., Abhilash, Meshram P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: focus on Scandium // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2018. Vol. 39. Iss. 3. P. 145–151. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>
7. Dmitriev A. The comprehensive utilisation of red mud utilisation in blast furnace // Metallurgical Solid Waste / ed. Yingyi Zhang. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80087>
8. Zhou Xianlin, Luo Yanhong, Chen Tiejun, Zhu Deqing. Enhancing the reduction of high-aluminum iron ore by synergistic reducing with high-manganese iron ore // Metals. 2019. Vol. 9. Iss. 15. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/met9010015>
9. Пягай И.Н., Кожевников В.Л., Пасечник Л.А., Скачков В.М. Переработка отвального шлама глиноземного производства с извлечением скандиевого концентрата // Записки Горного Института. 2016. Т. 218. С. 225–232.
10. Pontikes Y., Angelopoulos G.N. Bauxite residue in cement and cementitious applications: current status and a possible way forward // Resources, Conservation and Recycling. 2013. Vol. 73. P. 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.005>
11. Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N. Trends in red mud utilization – a review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2005. Vol. 26. Iss. 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.1080/08827500490477603>
12. Rai S., Wasewar K.L., Mukhopadhyay J., Yoo C., Uslu H. Neutralization and utilization of red mud for its better waste management // Archives of Environmental Science. 2012. Vol. 6. P. 13–33.
13. Garg A, Yadav H. Study of red mud as an alternative building material for interlocking block manufacturing in construction industry // International Journal of Materials Science and Engineering Study. 2015. Vol. 3. Iss. 4. P. 295–300. <https://doi.org/10.17706/ijmse.2015.3.4.295-300>
14. Трушко В.Л., Кусков В.Б., Кускова Я.В. Комплексная переработка богатых железных руд // Обогащение руд. 2014. № 1. P. 39–43.
15. Kuskova Y.V., Kuskov V.B. Development of technology for the production of natural red iron oxide pigments // Inżynieria Mineralna. 2017. № 1. P. 217–220.
16. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Extraction of iron values from red mud // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. Iss. 9. Part 1. P. 17064–17072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>
17. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Microwave reduction of red mud for recovery of iron values // Journal of Sustainable Metallurgy. 2018. Vol. 4. Iss. 3. P. 427–43. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0183-3>
18. Trushko V.L., Utkov V.A., Sivushov A.A. Reducing the environmental impact of blast furnaces by means of red mud from alumina production // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 8. P. 576–578. <https://doi.org/10.3103/S0967091217080149>
19. Shiryaeva E.V., Podgorodetskiy G.S., Malysheva T.Ya., Detkova T.V., Gorbunov V.B. Influence of lowalkali red mud on the composition and structure of sintering batch consisting of heterogeneous iron ore concentrates // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 9. P. 625–628. <https://doi.org/10.3103/S0967091214090150>
20. Трушко В.Л., Утков В.А. Разработка импортозамещающих технологий повышения производительности агломерационных машин и прочности агломератов // Записки Горного Института. 2016. Т. 221. С. 675–680. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.5.675>
21. Podgorodetskiy G., Gorbunov V., Panov A., Petrov S., Gorbachev S. Complex additives on the basis of red mud for intensification of iron-ore sintering and pelletizing // Light Metals / ed. M. Hyland. 2015. P. 107–111. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch20>
22. Kumar R., Srivastava J.P., Premchand. Utilization of iron values of red mud for metallurgical applications // Environmental and Waste Management / eds. A. Bandyopadhyay, N.G. Goswami, P.R. Rao. Jamshedpur: National Metallurgical Laboratory, 1998. P. 108–119. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2077.7446>
23. Balomenos E., Panias D. Iron recovery and production of high added value products from the metallurgical by-products of primary aluminium and ferronickel industries // 3rd International Slag Valorisation Symposium (Leuven, 19–20 March 2013). Leuven, 2013. P. 161–172.
24. Branca T.A., Colla V., Algermissen D., Granbom H., Martini U., Morillon A., Pietruck R., Rosendahl S. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe // Metals. 2020. Vol. 10. Iss. 3. P. 345. <https://doi.org/10.3390/met10030345>
25. Sadangi J.K., Das S.P., Tripathy A., Biswal S. K. Investigation into recovery of iron values from red mud dumps // Separation Science and Technology. 2018. Vol. 53. Iss. 14. P. 2186–2191. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1446984>
26. Утков В.А., Леонтьев Л.И. Повышение прочности агломератов и окатышей при помощи бокситового

красного шлама // Сталь. 2005. Т. 9. С. 2–4.

27. Singh S., Gupta D., Jain V., Sharma A.K. Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A Review // Materials and Manufacturing Processes. 2015. Vol. 30. Iss. 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.952028>
28. Jones D.A., Lelyveld T.P., Mavrofidis S.D., Kingman S.W., Miles, N.J. Microwave heating applications in environmental engineering - A review // Resources, Conservation and Recycling. 2002. Vol. 34. Iss. 2. P. 75–90. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00088-X)
29. Nishioka K., Taniguchi T., Ueki Y., Ohno K-I., Maeda T., Shimizu M. Gasification and reduction behavior of plastics and iron ore mixtures by microwave heating // ISIJ International. 2007. Vol. 47. Iss. 4. P. 602–607. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.602>
30. Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S., Basu D. Prospects of microwave processing: An overview // Bulletin of Materials Science. 2009. Vol. 32. Iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>
31. Guo Sheng-hui, Chen Guo, Peng Jin-hui, Chen Jin, Li Dong-bo, Liu Li-jun. Non-isothermal microwave leaching kinetics and absorption characteristics of primary titanium-rich materials // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010. Vol. 20. Iss. 4. P. 721–726. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60204-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60204-1)
32. Omran M., Fabritius T. Improved removal of zinc from blast furnace sludge by particle size separation and microwave heating // Minerals Engineering. 2018. Vol. 127. P. 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.002>
33. Bykov Yu.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. High-temperature microwave processing of materials // Journal of Physics D: Applied Physics. 2001. Vol. 34. P. R55–

R75. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/13/201>

34. Clark D.E., Folz D.C., West J.K. Processing materials with microwave energy // Materials Science and Engineering A. 2000. Vol. 287. No. 2. P. 153–158. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00768-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00768-1)
35. Vereš J., Lovás M., Hredzák S., Zubrik A., Dolinská S., Skřínský J. Application of microwave energy in waste treatment // Inżynieria Mineralna. 2017. Vol. 2017. Iss. 1. P. 39–44.
36. Agrawal D. Latest global developments in microwave materials processing // Materials Research Innovations. 2010. Vol. 14. Iss. 1. P. 3–8. <https://doi.org/10.1179/143307510X12599329342926>
37. El-Geassy A.A., Halim K.S.A., Bahgat M., Mousa E.A., El-Shereafy E.E., El-Tawil A.A. Carbothermic reduction of Fe₂O₃/C compacts: Comparative approach to kinetics and mechanism // Ironmaking and Steelmaking. 2013. Vol. 40. Iss. 7. P. 534–544. <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000076>
38. Aune R.E., Seetharaman S. Thermodynamic aspects of metals processing // Fundamentals of metallurgy // ed. S. Seetharaman. England: ED, 2005. P. 38–81.
39. Haque K.E. Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review // International Journal of Mineral Processing. 1999. Vol. 57. P. 1–24.
40. Litvinenko V. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied natural gas // Resources. 2020. Vol. 9. Iss. 59. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/resources9050059>
41. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. No. 3. P. 1521–1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>

References

1. Khalifa AA, Utkov VA, Brichkin VN. Red mud effect on dicalcium silicate polymorphism and sinter self-destruction prevention. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(1):231–240. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-231-240>
2. Brichkin VN, Dubovikov OA, Nikolaeva NV, Besedin AA. Red mud dewatering and basic trends in its recycling. *Obogashcheniye rud*. 2014;1:44–48. (In Russ.)
3. Besedin AA, Utkov VA, Brichkin VN, Sizyakov VM. Red mud sintering. *Obogashcheniye rud*. 2014;2:28–31. (In Russ.)
4. Piirainen VY, Boeva AA, Nikitina TY. Application of new materials for red mud immobilization. *Key Engineering Materials*. 2020;854:182–188.
5. Trushko VL, Dashko RE, Kuskov VB, Klyamko AS. Technology of “cold” briquetting of rich ores of the Jakovlevsky deposit. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2011;190:133–137. (In Russ.)
6. Akcil A, Akhmediyeva N, Abdulvaliyev R, Abhilash, Meshram P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: focus on Scandium. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018;39(3):145–151.

<https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>

7. Dmitriev A. The comprehensive utilisation of red mud utilisation in blast furnace. In: Zhang Yingyi (ed.). *Metallurgical Solid Waste*. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80087>
8. Zhou Xianlin, Luo Yanhong, Chen Tiejun, Zhu Deqing. Enhancing the reduction of high-aluminum iron ore by synergistic reducing with high-manganese iron ore. *Metals*. 2019;9(15):1–12. <https://doi.org/10.3390/met9010015>
9. Pyagay IN, Kozhevnikov VL, Pasechnik LA, Skachkov VM. Processing of alumina production red mud with recovery of scandium concentrate. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;218:225–232. (In Russ.)
10. Pontikes Y, Angelopoulos GN. Bauxite residue in cement and cementitious applications: current status and a possible way forward. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;73:53–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.005>
11. Paramguru RK, Rath PC, Misra VN. Trends in red mud utilization – a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2005;26(1):1–29. <https://doi.org/10.1080/08827500490477603>
12. Rai S, Wasewar KL, Mukhopadhyay J, Yoo C, Uslu H.

Neutralization and utilization of red mud for its better waste management. *Archives of Environmental Science*. 2012;6:13–33.

13. Garg A, Yadav H. Study of red mud as an alternative building material for interlocking block manufacturing in construction industry. *International Journal of Materials Science and Engineering Study*. 2015;3(4):295–300. <https://doi.org/10.17706/ijmse.2015.3.4.295-300>

14. Trushko VL, Kuskov VB, Kuskova YV. Integrated processing of highgrade iron ores. *Obogashcheniye rud*. 2014;1:39–43. (In Russ.)

15. Kuskova YV, Kuskov VB. Development of technology for the production of natural red iron oxide pigments. *Inżynieria Mineralna = Journal of the Polish Mineral Engineering*. 2017;1:217–220.

16. Agrawal S, Rayapudi V, Dhawan N. Extraction of iron values from red mud. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(9-1):17064–17072.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>

17. Agrawal S, Rayapudi V, Dhawan N. Microwave reduction of red mud for recovery of iron values. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2018;4(3):427–43. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0183-3>

18. Trushko VL, Utkov VA, Sivushov AA. Reducing the environmental impact of blast furnaces by means of red mud from alumina production. *Steel in Translation*. 2017;47(8):576–578.

<https://doi.org/10.3103/S0967091217080149>

19. Shiryayeva EV, Podgorodetskiy GS, Malysheva TYa, Detkova TV, Gorbunov VB. Influence of lowalkali red mud on the composition and structure of sintering batch consisting of heterogeneous iron ore concentrates. *Steel in Translation*. 2014;44(9):625–628. <https://doi.org/10.3103/S0967091214090150>

20. Trushko VL, Utkov VA. Development of import substituting technologies for increasing productivity of sintering machines and strength of agglomerates. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;221:675–680. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.5.675>

21. Podgorodetskiy G, Gorbunov V, Panov A, Petrov S, Gorbachev S. Complex additives on the basis of red mud for intensification of iron-ore sintering and pelletizing. In: Hyland M (ed.). *Light Metals*; 2015, p. 107–111. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch20>

22. Kumar R, Srivastava JP, Premchand. Utilization of iron values of red mud for metallurgical applications. In: Bandopadhyay A, Goswami NG, Rao PR (eds.). *Environmental and Waste Management*. Jamshedpur: National Metallurgical Laboratory; 1998, p. 108–119. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2077.7446>

23. Balomenos E, Parias D. Iron recovery and production of high added value products from the metallurgical by-products of primary aluminium and ferronickel industries. In: *3rd International Slag Valorisation Symposium*. 19–20 March 2013, Leuven. Leuven; 2013, p. 161–172.

24. Branca TA, Colla V, Algermissen D, Granbom H, Martini U, Morillon A, Pietruck R, Rosendahl S. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. *Metals*. 2020;10(3):345.

<https://doi.org/10.3390/met10030345>

25. Sadangi JK, Das SP, Tripathy A, Biswal S. K. Investigation into recovery of iron values from red mud dumps. *Separation Science and Technology*. 2018;53(14):2186–2191. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1446984>

26. Utkov VA, Leontiev LI. Increasing the strength of agglomerates and pellets with bauxite red mud. *Stal'*. 2005;9:2–4. (In Russ.)

27. Singh S, Gupta D, Jain V, Sharma AK. Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015;30(1):1–29. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.952028>

28. Jones DA, Lelyveld TP, Mavrofidis SD, Kingman SW, Miles, NJ. Microwave heating applications in environmental engineering – a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2002;34(2):75–90. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00088-X)

29. Nishioka K, Taniguchi T, Ueki Y, Ohno K-I, Maeda T, Shimizu M. Gasification and reduction behavior of plastics and iron ore mixtures by microwave heating. *ISIJ International*. 2007;47(4):602–607.

<https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.602>

30. Das S, Mukhopadhyay AK, Datta S, Basu D. Prospects of microwave processing: An overview. *Bulletin of Materials Science*. 2009;32(1):1–13. <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>

31. Guo Sheng-hui, Chen Guo, Peng Jin-hui, Chen Jin, Li Dong-bo, Liu Li-jun. Non-isothermal microwave leaching kinetics and absorption characteristics of primary titanium-rich materials. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010;20(4):721–726. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60204-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60204-1)

32. Omran M, Fabritius T. Improved removal of zinc from blast furnace sludge by particle size separation and microwave heating. *Minerals Engineering*. 2018;127:265–276. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.002>

33. Bykov YuV, Rybakov KI, Semenov VE. High-temperature microwave processing of materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001;34:R55–R75. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/13/201>

34. Clark DE, Folz DC, West JK. Processing materials with microwave energy. *Materials Science and Engineering A*. 2000;287(2):153–158. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00768-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00768-1)

35. Vereš J, Lovás M, Hredzák S, Zubrik A, Dolinská S, Skřinský J. Application of microwave energy in waste treatment. *Inżynieria Mineralna = Journal of the Polish Mineral Engineering*. 2017;2017(1):39–44.

36. Agrawal D. Latest global developments in microwave materials processing. *Materials Research Innovations*. 2010;14(1):3–8. <https://doi.org/10.1179/143307510X12599329342926>

37. El-Geassy AA, Halim KSA, Bahgat M, Mousa EA, El-Shereafy EE, El-Tawil AA. Carbothermic reduction of Fe₂O₃/C compacts: Comparative approach to kinetics and mechanism. *Ironmaking and Steelmaking*. 2013;40(7):534–544.

<https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000076>

38. Aune RE, Seetharaman S. Thermodynamic aspects of

metals processing. In: Seetharaman S. (ed.). *Fundamentals of metallurgy*. England: ED; 2005, p. 38–81.
39. Haque KE. Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review. *International Journal of Mineral Processing*. 1999;57:1–24.
40. Litvinenko V. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied

natural gas. *Resources*. 2020;9(59):1–22. <https://doi.org/10.3390/resources9050059>
41. Litvinenko VS. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020;29(3):1521–1541. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-4>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Халифа Ахмед Абделазим Элсайед Ибрагим Абду,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О.,
2, Россия;
✉ e-mail: engahmedkhalifa2@gmail.com

Бажин Владимир Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О.,
2, Россия;
e-mail: bazhin-alfail@mail.ru

Шалаби Мохамед Эль Меншауй Хуссейн,
профессор, доктор технических наук,
Центральный научно-исследовательский
металлургический институт,
11421, г. Каир, г. Хелуан, пос. Эль-Таббин,
ул. Эльфелезат, 1, Египет;
e-mail: mehshalabi@hotmail.com

Абдельмонеим Ахмед,
аспирант,
Университет Оулу,
FI-90014, г. Оулу, р-н Линнанмаа, ул. Пентти Кайтеран
кату, 1, Финляндия;
e-mail: ahmed.abdelmonem@oulu.fi

Омран Мамдух,
доцент исследовательская группа технологической
металлургии,
Университет Оулу,
FI-90014, г. Оулу, р-н Линнанмаа, ул. Пентти Кайтеран
кату, 1, Финляндия;
e-mail: mamdouh.omran@oulu.fi

Заявленный вклад авторов

Халифа Ахмед Абделазим Элсайед Ибрагим Абду – изучение особенностей технологии утилизации красного шлама путем карботермического восстановления при обработке микроволнами, методология и процесс исследования. Бажин Владимир Юрьевич – планирование эксперимента для изучения технологии утилизации красного шлама путем карботермического восстановления при микроволновой обработке и обсуждение результатов. Шалаби Мохамед Эль Меншауй

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ahmed A. Khalifa,
Ph.D. student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
✉ e-mail: engahmedkhalifa2@gmail.com

Vladimir Yu. Bazhin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Automation of Technological
Processes and Production,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;
e-mail: bazhin-alfail@mail.ru.

Mohammed E.-M.H. Shalabi,
Professor, Dr. Sci. (Eng.),
Central Metallurgical Research Institute,
1, Elfelezat St., El-Tebbin, Helwan, Cairo 11421, Egypt;
e-mail: mehshalabi@hotmail.com

Ahmed Abdelmoneim,
Ph.D. student,
University of Oulu,
Pentti Kaiteran katu 1, Linnanmaa, FI-90014,
Oulu, Finland;
e-mail: ahmed.abdelmonem@oulu.fi

Mamdouh Omran,
Associate Professor of the Process Metallurgy Research
Group,
University of Oulu,
Pentti Kaiteran katu 1, Linnanmaa, FI-90014,
Oulu, Finland;
e-mail: mamdouh.omran@oulu.fi

Contribution of the authors

Khalifa Ahmed Abdelazim Elsayed Ibraheem Abdou studied the features of the recycling technology of red mud by carbothermal reduction under microwave treatment, methodology and research. Bazhin Vladimir was responsible for planning the experiment for studying the recycling technology of red mud by carbothermal reduction under microwave treatment and result discussion. Mohamed El-Menshawi Hussein Shalabi gave the rationale for the study and made the conclusions of the scientific results.

Хуссейн – обоснование исследования и выводы научных результатов. Абдельмонеим Ахмед– обработка результатов эксперимента. Омран Мамдух– интерпретация научных результатов и проведение экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.01.2021; одобрена после рецензирования 01.03.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Ahmed Abdelmoneim processed the results of the experiment. Mamdouh Omran performed the interpretation of the scientific results and conducted experiments.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 11.01.2021; approved after reviewing 01.03.2021; accepted for publication 29.04.2021.

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
№ 2 (157) 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 29.04.2021 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 18.
Тираж 500 экз. Заказ 58. Поз. плана 3н.

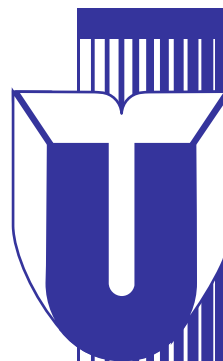
Издание распространяется **бесплатно**

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

