

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

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

Том 24 № 6
2020

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, 2020

Том 24 № 6

2020

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 24 № 6

2020

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,
ауд. Д-215, e-mail: pgg@istu.edu

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

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Vol. 24 No. 6

2020

Publishers of Irkutsk National
Research Technical University

Editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

RAKHIMYANOV Kh.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)

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

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

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

TANUTROV I.N., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)

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

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

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

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

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

Subscription index in the catalog
of JSC «Economic Newspaper»
Publishing House
“The united catalog. Russian press.
Newspapers and journals”-
41476 (OK + EC)
Address of JSC
«Economic Newspaper»:
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,
D-215, e-mail: pgp@istu.edu

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	1174
------------------	------

Машиностроение и машиноведение

 Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Система управления качеством кромки при финишной обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами и ее анализ. Часть 2.....	1178
 Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Анализ прогрессивных технологий механообработки транспедикулярных винтов.....	1190
 Сладкова Л.А., Крылов В.В., Кузнецов Ф.А. Установка физического моделирования ветровой нагрузки на крановые конструкции.....	1199

Энергетика

 Береснева Н.М., Пяткова Н.И. Особенности определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса в исследованиях надежности топливно- и энергоснабжения.....	1209
 Бузунова М.Ю. Диэлектрические потери при термической обработке дисперсных сред.....	1223
 Мадышев И.Н., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Данг С.В., Бадретдинова Г.Р. Исследование влияния диаметра выходных отверстий на эффективность разделения эмульсии в прямоугольных сепараторах.....	1232
 Миронов М.А., Козлов С.А. Исследование и разработка системы автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения технических средств охраны.....	1243
 Нефедов А.С., Яковкина Т.Н. Многокритериальный выбор мощности электростанций на основе возобновляемых источников энергии и местных видов топлива в составе локальной энергосистемы.....	1255
 Такайшвили Л.Н., Агафонов Г.В. Перспективы использования энергетических углей Иркутской области.....	1271
 Хозяинов Б.П., Свистунова Т.Н. Экономическое обоснование использования вертикально-осевой ветроэнергетической установки в условиях ветрового режима России...	1285
 Чеботнягин Л.М., Потапов В.В., Иванов Н.А., Иванчик Н.Н. Компактирование порошковых материалов импульсным давлением, создаваемым плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника.....	1297

Металлургия и материаловедение

 Бараускас А.Э., Немчинова Н.В. Гидрометаллургическая переработка мелкодисперсного фторуглеродсодержащего техногенного сырья производства первичного алюминия.....	1311
 Горланов Е.С. К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 1.....	1324
 Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э. Исследование двойного электрического слоя при сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли.....	1337
 Паляницын П.С., Петров П.А., Бажин В.Ю. К вопросу ресурсо- и энергосбережения в производстве корунда.....	1347

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Vol. 24 No. 6

2020

CONTENTS

Contents.....	1175
---------------	------



Mechanical Engineering and Machine Science



Dimov Yu.V., Podashev D.B. Edge quality control system at finishing treatment by elastic polymer abrasive tools and its analysis. Part 2.....	1178
Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Analysis of advanced transpedicular screw machining technologies.....	1190
Sladkova L.A., Krylov V.V., Kuznetsov F.A. Installation of physical simulation of wind load on crane structures.....	1199



Power Engineering



Beresneva N.M., Pyatkova N.M. Determination features of fuel and energy complex critically important facilities in fuel and energy supply reliability studies.....	1209
Buzunova M.Yu. Dielectric losses under heat treatment of dispersed media.....	1223
Madyshev I.N., Zinurov .VE., Dmitriev A.V., Dang Xuan Vinh, Badretdinova G.R. Investigation of outlet diameter effect on emulsion separation efficiency in rectangular separators.....	1232
Mironov M.A., Kozlov S.A. Research and development of a PV converter-based stand-alone power supply system for technical security equipment power supply.....	1243
Nefedov A.S., Yakovkina T.N. Multi-criterial choice of capacity of power plants based on renewable energy sources and local fuels within local energy system.....	1255
Takaishvili L.N., Agafonov G.V. Application prospects of Irkutsk region energy coals.....	1271
Khozyainov B.P., Svistunova T.N. Economic justification for the use of a vertical axis wind power plant in wind conditions of Russia.....	1285
Chebotnyagin L.M., Potapov V.V., Ivanov N.A., Ivanchik N.N. Compacting nanopowder materials by a pulse pressure generated by expanding plasma channel of a spark ignited by wire electrical explosion.....	1297



Metallurgy and Materials Science



Barauskas A.E., Nemchinova N.V. Hydrometallurgical processing of technogenic finely dispersed fluorocarbon-containing raw materials of primary aluminum production.....	1311
Gorlanov E.S. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 1.....	1324
Elshin V.V., Golodkov Yu.E. Studying electric double layer under sorption of gold on activated carbons from thiocarbamide solutions.....	1337
Palyanin P.S., Petrov P.A., Bazhin V.Yu. Issues of resource and energy saving in corundum production.....	1347

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Уважаемые читатели!

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

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

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

«Вестник ИргТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University
Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Dear Readers!

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

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

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

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

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

Editorial Board





Система управления качеством кромки при финишной обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами и ее анализ. Часть 2

© Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – разработка алгоритма реализации системы управления качеством кромки при финишной обработке деталей полимерно-абразивными щетками, рассмотренной в части 1. Использован принцип системного подхода для формализованного описания системы с наличием взаимосвязей между образующими ее подсистемами. В статье рассмотрен алгоритм проектирования технологической операции обработки кромок в соответствии с системой оптимального управления, описанной в части 1. Исходными данными явились: параметры заготовки, требования по шероховатости и параметрам кромки, характеристики инструмента и оборудования. На основе проведенного анализа функциональных возможностей операции получен алгоритм выбора оптимального инструмента среди конкурирующих, с учетом технологических возможностей операции. На базе разработанных математических моделей (формирование скругленной кромки по размеру, форма и шероховатость, сила резания, температура в зоне обработки, износ инструмента) проведена оптимизация технологических параметров операции. Разработанный алгоритм проектирования технологической операции предусматривает проведение пробной операции (установка и крепление заготовки на оборудовании, ее обработка на оптимальных режимах) и контроль соответствия результатов обработки требованиям нормативно-технических документов, анализ дефектов и причин их возникновения, а также формирование управляющего воздействия. Рассмотрена управляющая подсистема «Оптимизация процесса скругления кромок». Разработанная система проектирования технологической операции обработки кромки эластичными полимерно-абразивными щетками позволяет назначать наиболее эффективные инструменты и рациональные режимные параметры обработки с обеспечением всех требований нормативно-технических документов по качеству обработки при наибольшей производительности процесса и наименьшей себестоимости выполнения операции.

Ключевые слова: финишная обработка, система оптимального управления, эластичный инструмент, требуемое качество, оптимальная производительность

Для цитирования: Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Система управления качеством кромки при финишной обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами и ее анализ. Часть 2. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1178–1189. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1178-1189>

Edge quality control system at finishing treatment by elastic polymer abrasive tools and its analysis. Part 2

Yury V. Dimov, Dmitry B. Podashev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The goal is to develop an algorithm for implementing the edge quality management system for finishing parts with polymer-abrasive brushes, discussed in part 1. The principle of the system approach is used for a formalized description of the system with the presence of relationships between its constituent subsystems. The article considers the algorithm for designing the technological operation of edge processing in accordance with the optimal control system described in part 1. The initial data were: parameters of the workpiece, requirements for roughness and edge parameters, characteristics of tools and equipment. Based on the analysis of the functional capabilities of the operation, an algorithm for selecting the optimal tool among competing ones is obtained, taking into account the technological capabilities of the operation. Based on the developed mathematical models (formation of a rounded edge in size, shape and roughness, cutting force, temperature in the processing zone, tool wear), the optimization of technological parameters of the operation was carried out. The developed algorithm for designing a technological operation provides for conducting a test operation (installing and attaching the workpiece to the equipment, processing it at optimal modes) and monitoring the

compliance of processing results with the requirements of regulatory and technical documents, analyzing defects and their causes, as well as forming a control effect. The control subsystem "Optimization of the process of rounding edges" is considered. Developed system for design of technological operations of processing of the edge elastic polymer-abrasive brushes allows you to assign the most effective tools and rational regime treatment parameters ensuring all requirements of normative-technical documents on the quality of processing at the highest productivity and lowest cost of operation.

Keywords: finishing, optimal control system, flexible tool, required quality, optimal performance

For citation: Dimov YuV, Podashev DB. Edge quality control system at finishing treatment by elastic polymer abrasive tools and its analysis. Part 2. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1178–1189. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1178-1189>

АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ОБРАБОТКИ КРОМОК

Алгоритм проектирования операции скругления кромки эластичными полимерно-абразивными инструментами, разработанный в соответствии с принципами, изложенными в части I, представлен на рис. 1.

Исходными данными для проектирования технологической операции служат:

1) параметры заготовки (блок 1) – конструктивные, размерные, физико-механические свойства, исходная шероховатость, наличие заусенцев и труднодоступных участков;

2) технические требования на обработанную деталь (блок 2) – требуемая шероховатость, требуемый размер кромки, отклонение месторасположения кромки;

3) имеющийся в наличии эластичный инструмент и его свойства (блок 3) – конструкция, размеры, материал зерна, температура плавления связки, зернистость, модуль упругости, жесткость, износостойкость;

4) имеющееся в наличии оборудование (блок 4) – станок с ЧПУ, промышленный робот, специальный станок, универсальный станок.

Целями обработки являются: скругление острых кромок (блок 5) с требуемыми размерами и геометрическими параметрами.

Финишная обработка эластичными полимерно-абразивными инструментами, как и любой другой вид обработки, обладает определенными ограничениями в функциональных возможностях операций. Блок 6 предусмотрен для проведения анализа функциональных возможностей операций. Если реализация невозможна, информация передается на блок 8, где решается вопрос о передаче информации на блок 10 для формирования управ-

ляющего воздействия (выбор другого инструмента из имеющихся в наличии, свойства которого позволяют выполнить реализацию данной операции, возможно приобретение нового инструмента с необходимыми свойствами, выбор другого оборудования) или об отказе от дальнейшего проектирования операции (полное несоответствие параметров заготовки функциональным возможностям операции, полное отсутствие на предприятии необходимого инструмента и оборудования).

Если функциональные возможности не препятствуют реализации данной операции (блок 7), то информация передается в блок 9 для дальнейшего проектирования операции. При этом следует отметить, что в наличии на предприятии может оказаться сразу несколько инструментов, которыми можно выполнить рассматриваемую операцию (конкурирующие инструменты). Таким образом, дальнейшее проектирование операции сводится к выбору инструмента и режимных параметров обработки, при которых достигается требуемое качество обработки при наибольшей производительности и наименьшей себестоимости выполнения операции. В блоке 9 осуществляется выбор любого инструмента среди конкурирующих с учетом технологических рекомендаций, в том числе приведенных по результатам исследований, описанных в работах [1–23]. Так, например, для скругления легкодоступных кромок, в том числе на длиннономерных деталях, рекомендовано использование эластичных полимерно-абразивных радиальных щеток. Для обработки зон ограниченного доступа, сочетаний различных поверхностей и т.д. целесообразно использование торцевых щеток или радиальных щеток малого диаметра.



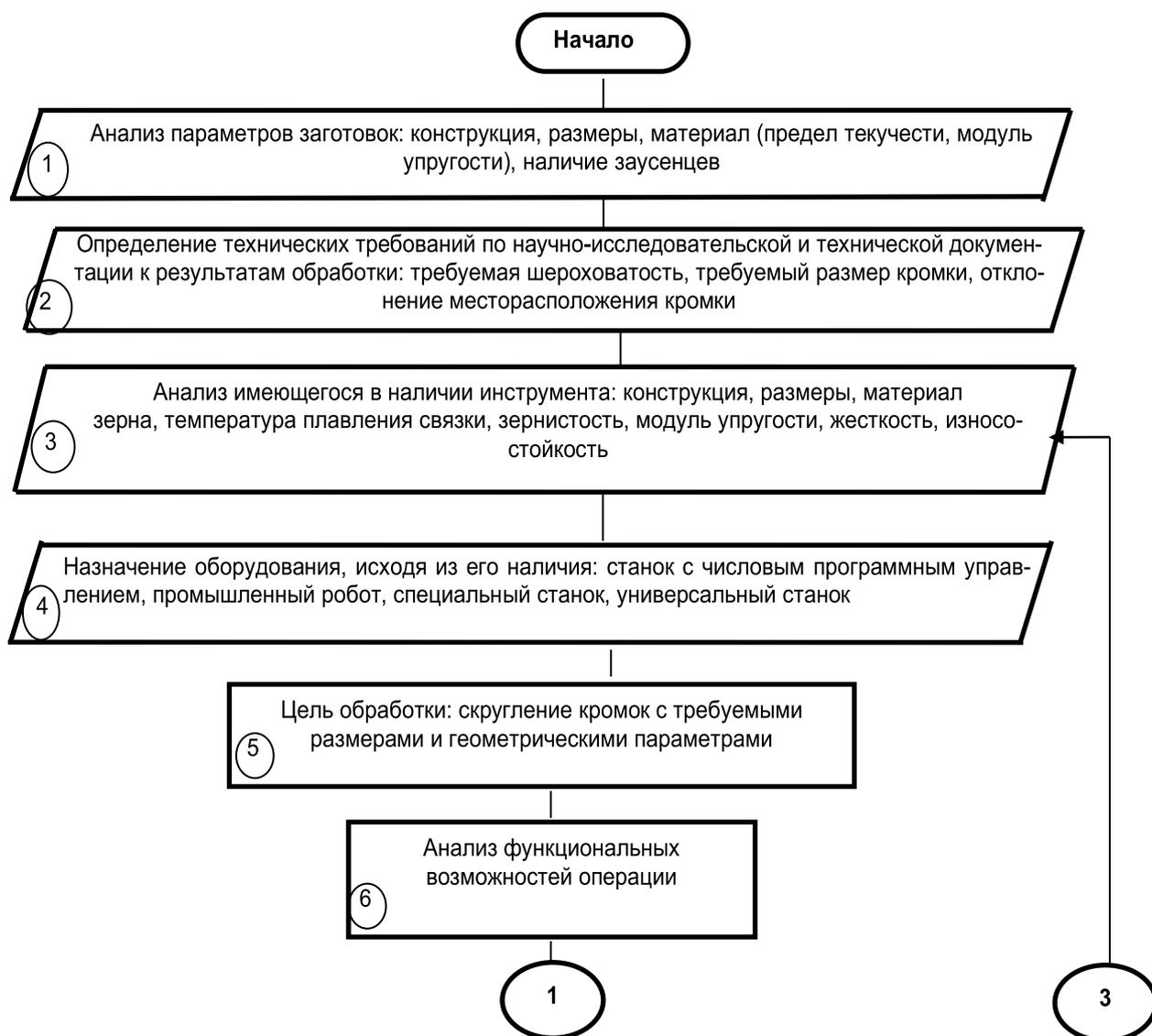
Для выбора инструмента, который способен обеспечить оптимальные режимные параметры обработки, необходимо использовать разработанные математические модели для операции скругления кромок, рассмотренные в части 1.

Для того чтобы воспользоваться предложенными математическими моделями, необходимо иметь следующие исходные данные:

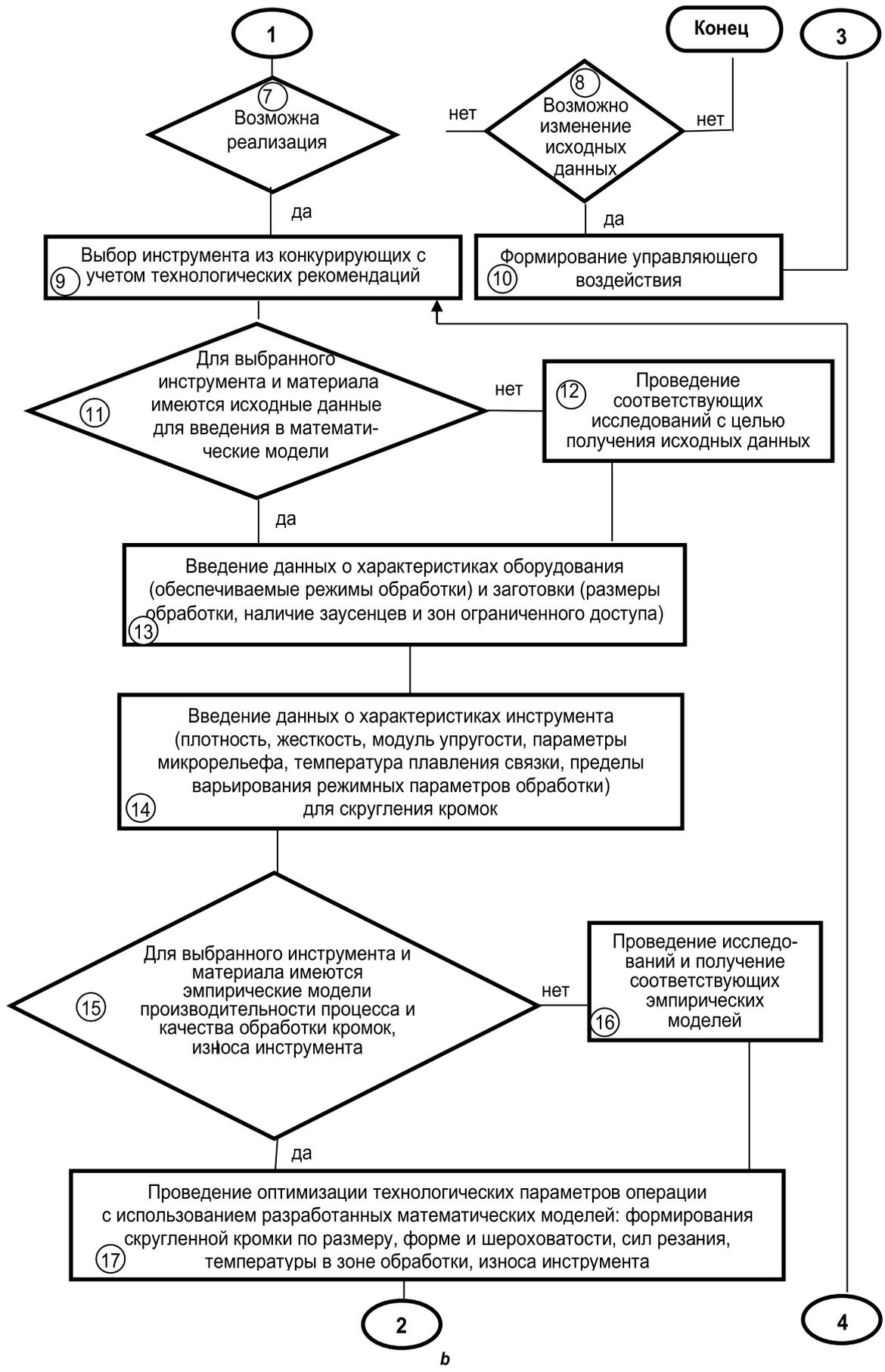
- характеристики оборудования (обеспечиваемые режимы обработки);
- характеристики заготовки: размеры обработки, наличие заусенцев и зон ограниченного доступа);
- характеристики инструмента (жесткость, модуль упругости, температура плавления

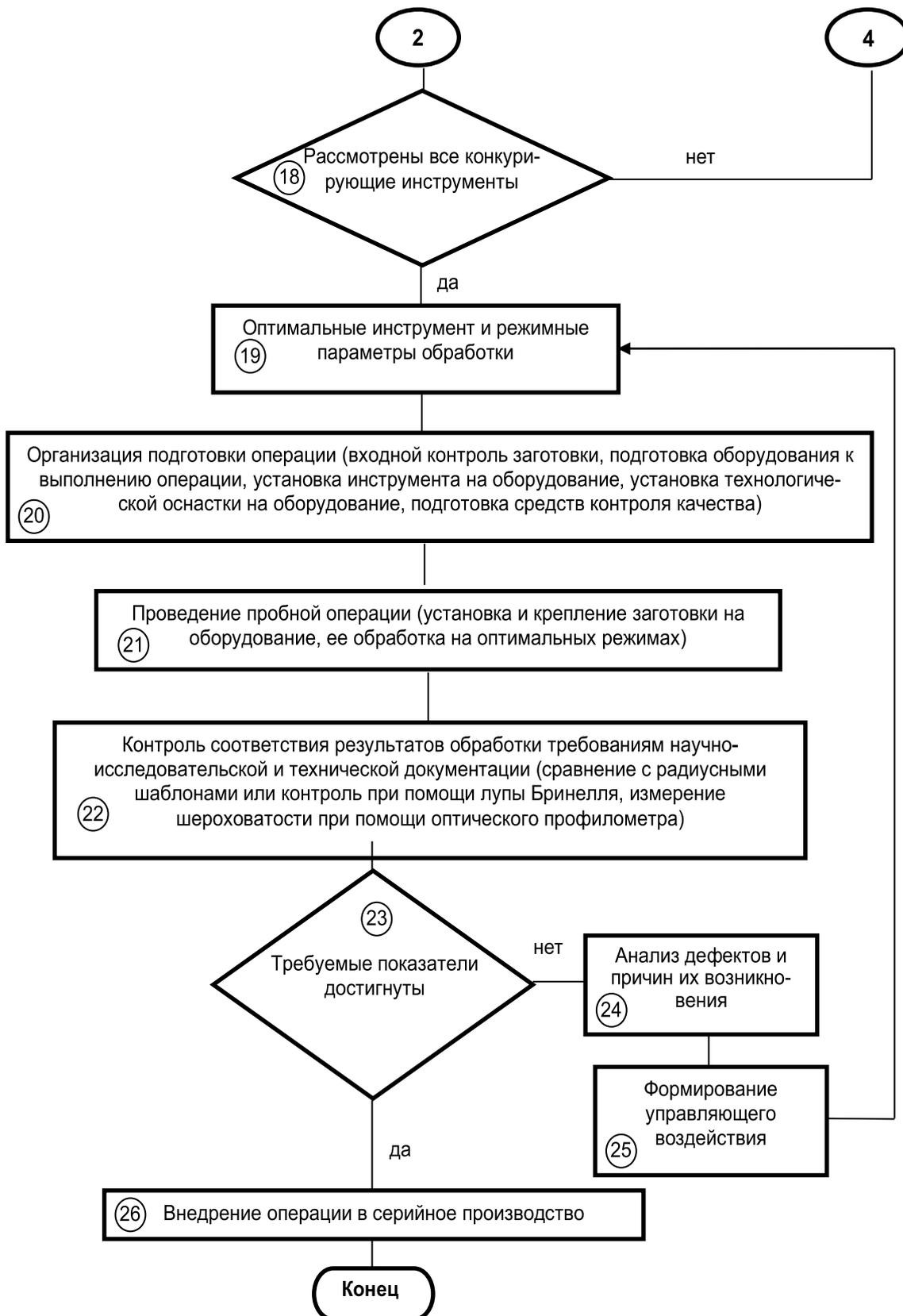
связки, пределы варьирования режимных параметров обработки).

Если все вышеперечисленные исходные данные имеются (блок 11), то осуществляется введение этих данных в разработанные математические модели (блоки 13 и 14) и переход к блоку 15. Следует отметить, что, как правило, для получения требуемых исходных данных необходимо статистически оценивать как средние, так и предельные величины указанных параметров. Пределы варьирования режимных параметров обработки определяются из условий стойкости инструмента и достаточности для решения рассматриваемой технологической задачи.



a





с

Рис. 1. Схема алгоритма проектирования операций скругления кромки (а–с)
Fig. 1. Diagram of the algorithm for designing rounding operations (a–c)

Если для выбранного инструмента и материала заготовки проведены соответствующие исследования (блок 15), то осуществляется расчет вышеописанных показателей по имеющимся эмпирическим моделям и переход к блоку 17. Если таких исследований нет, то необходимо проведение соответствующих исследований (блок 16) и построение эмпирических моделей в соответствии с методиками, изложенными в соответствующих разделах работы.

Таким образом, на основе разработанных теоретических и эмпирических моделей проводится оптимизация технологических параметров для выбранного инструмента (блок 17).

Для оптимизации рассматриваемых технологических операций назначаются технологические ограничения: достижимая шероховатость R_a поверхности детали, обеспечиваемая данным инструментом, размер кромки. После перебора всех сочетаний варьируемых режимных параметров, определяется сочетание режимов (скорость резания V (частота вращения n для торцевых инструментов), деформация инструмента (ΔY), подача S , углы положения инструмента относительно обрабатываемой кромки (α , β), смещение A относительно обрабатываемой кромки для торцевых инструментов), обеспечивающее выполнение рассматриваемых технологических операций с наибольшей производительностью и наименьшей себестоимостью при соблюдении всех необходимых ограничений.

Если рассмотрены не все конкурирующие инструменты, которые можно применить для выполнения исследуемой операции, то необходимо осуществить выбор следующего инструмента (возврат к блоку 9).

После того, как все конкурирующие инструменты рассмотрены, и оптимизация технологических параметров для них проведена, осуществляется выбор оптимального инструмента среди конкурирующих и определение оптимальных режимов обработки V (или n для торцевых щеток), ΔY , S (блок 19). Основным критерием выбора оптимального инструмента является его наибольшая экономическая эффективность (минимальная себестоимость выполнения операции).

Следует отметить, что для получения стабильного качества обработки и получения достоверных результатов по предложенным теоретическим и эмпирическим математическим моделям при проектировании операции в целом требуется наличие в технологическом процессе ряда организационно-технических мероприятий, а именно:

1. Организация подготовки операции (блок 20), которая включает в себя:

- организацию технологических мероприятий статистического контроля качества заготовок, поступающих на выполнение рассматриваемых в настоящей работе операций, по перечисленным характеристикам (см. блок 1). При оценке состояния обрабатываемой заготовки производится измерение размеров, фиксируются предел прочности, предел текучести, модуль упругости, коэффициент Пуассона. В целях снижения временных и трудовых затрат на проведение данных мероприятий целесообразно организационно обеспечить стабильное соответствие поставляемых заготовок требуемым характеристикам;

- подготовку оборудования к выполнению операции (запуск, анализ 3D-модели детали, разработку управляющих программ и т.д.), установку инструмента и технологической оснастки на оборудование;

- подготовку средств контроля качества обработки.

2. Проведение пробной операции (блок 21), которая подразумевает:

- установку и крепление заготовки на оборудование;

- обработку детали оптимальным инструментом на оптимальных режимах с соблюдением всех технологических рекомендаций. Такими технологическими рекомендациями могут быть: соблюдение рекомендаций по периодическому контролю износа и своевременной замене критически изношенного инструмента. Критический износ устанавливается опытным путем и зависит от вида инструмента и условий производства;

- проведение периодической корректировки натяга (деформации) ΔY в связи с износом инструмента. Параметром, по которому необходимо оценивать состояние изно-



шенности инструмента, является время Тизн, в течение которого натяг ΔY уменьшился на допустимую величину износа Иззн.

3. Организация контроля соответствия результатов обработки эластичным полимерно-абразивным инструментом требованиям научно-исследовательской и технической документации (НТД).

При анализе требований НТД следует обратить внимание на допустимые колебания шероховатости, размеров кромок, точности их формы и месторасположения. Контроль соответствия результатов обработки требованиям НТД может осуществляться при обработке кромок (блок 22): контроль по радиусным шаблонам или контроль при помощи лупы Бринелля, включая контроль стабильности обработки кромок на протяженных и труднодоступных участках, а также измерение шероховатости при помощи эталонов шероховатости и лупы.

Если требуемые НТД показатели качества обработки достигнуты (блок 23), то следует констатировать, что возможно внедрение рассматриваемых операций в серийное производство (блок 26).

Если требуемые НТД показатели качества обработки не достигнуты, то необходимо осуществить анализ дефектов и причин их возникновения (блок 24).

Причины возникновения дефектов могут быть следующими:

– заготовка представлена с исходными показателями по входным параметрам, отличающимися, в связи с их стохастическим характером, от показателей, введенных номинальных (средних) значений в рассматриваемую систему управления;

– взаимное расположение поверхностей в заготовке не позволяет полностью реализовать финишную операцию эластичными полимерно-абразивными инструментами на всех поверхностях, отдельные участки могут быть с отклонениями от требуемых параметров качества;

– инструмент существенно отличается (и не мог быть обнаружен при выполнении контроля по блоку 20) по своим эксплуатационным показателям от исследованного инструмента такой же марки и введенного в систему.

Разработанная в настоящей работе система управления позволяет минимизировать влияние приведенных выше причин путем:

1) проведения дополнительных экспериментальных исследований по фактическим показателям заготовки и имеющегося инструмента;

2) введения дополнительной операции по обработке труднодоступного участка со сменной инструмента, которым такой участок может быть обработан;

3) возвращения к блоку 19 и корректировки полученных режимов обработки V (или n для торцевых щеток), ΔY и S . Корректировка может проводиться за счет любого из этих параметров. Например, если при обработке кромки обнаружен не полностью удаленный заусенец и не достигнуто требуемое значение параметра Q , то корректировку можно осуществить за счет изменения подачи S . Для этого из уравнения [7] количества материала, снятого при скруглении кромки, определяется подача S , при которой будет обеспечен требуемый размер кромки Zk :

$$Q = a_1 \cdot \Delta Y^2 + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot S^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_6 \cdot S + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_8 \cdot \Delta Y \cdot S + a_9 \cdot V \cdot S + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V \cdot S + a_{11}$$

При заданных Q , ΔY , V , подача S определяется по формуле:

$$S = \frac{-d + \sqrt{d^2 - 4a_3 \cdot f}}{2a_3},$$

где $d = a_6 + a_8 \cdot \Delta Y + a_9 \cdot V + a_{10} \cdot \Delta Y \cdot V$;
 $f = a_1 \cdot (\Delta Y)^2 + a_2 \cdot V^2 + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V + a_7 \cdot \Delta Y \cdot V + a_{11} - Q$.

Аналогичная корректировка может быть выполнена при обработке кромок торцевыми полимерно-абразивными щетками.

Для оптимизации режимных параметров при скруглении кромок деталей из материалов, рассмотренных в настоящей работе, исследованными эластичными полимерно-абразивными щетками, разработаны программные модули, алгоритм реализации.

УПРАВЛЯЮЩАЯ ПОДСИСТЕМА «ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СКРУГЛЕНИЯ КРОМОК»

Управляющая подсистема оптимизации процесса скругления кромок деталей эластичными полимерно-абразивными щетками разработана на основе математических моделей:

- производительности процесса обработки (Q);
- точности месторасположения (позиционирование) радиуса – δ ;
- достижимой шероховатости поверхности скругленных кромок;
- износа инструмента;
- температуры в зоне резания;
- силы резания.

Структура подсистемы оптимизации при заданном инструменте представлена на рис. 2. При оптимизации процесса обработки в

качестве критерия оптимизации целесообразно принять целевую экономическую функцию (ЦЭФ), которая рассчитывается по приведенной ниже программе для определенного инструмента. ЦЭФ предназначена для оценки себестоимости всех вариантов процесса и выбора режимов обработки с наименьшим ее значением. Критерием выбора оптимального из рассматриваемых инструментов является минимальное значение ЦЭФ:

$$ЦЭФ = T_{обр} \cdot (C_T + Z_{эл}) + T_B \cdot C_T + C.$$

ЦЭФ включает в себя следующие целевые функции (ЦФ):

- ЦФ основного времени обработки $T_{обр}$;
- ЦФ затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы $Z_{эл}$;



Рис. 2. Структура подсистемы оптимизации скругления кромок эластичными полимерно-абразивными щетками
 Fig. 2. The structure of the subsystem for optimizing rounding of edges with elastic polymer abrasive brushes



– ЦФ стоимости эластичного полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции С.

Ограничительными функциями (ОФ) для различных инструментов являются уравнения достижимой шероховатости, размера кромки и температуры резания для торцевых щеток.

В состав ЦЭФ входят:

1. Измеряемые и регулируемые в процессе выполнения операции входные переменные. Для ЦФ основного времени обработки $T_{обр}$ такими переменными являются: скорость резания V (для торцевых щеток – частота вращения n), деформация инструмента ΔY , продольная подача S .

2. Измеряемые и нерегулируемые в процессе выполнения операции входные переменные:

– для ЦФ основного времени обработки $T_{обр}$ – это длина обрабатываемой кромки; параметры эластичного полимерно-абразивного инструмента (B_k – ширина инструмента, r_k – радиус втулки инструмента, D_k – диаметр инструмента, ρ – плотность материала инструмента);

– для ЦФ затрат на расход электроэнергии в единицу времени работы ($Z_{эл}$) – это требуемая мощность привода ($N_{эл}$) и стоимость одного кВт/ч ($C_{эл}$);

– для ЦФ стоимости эластичного полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции (С) – это, собственно, стоимость эластичного полимерно-абразивного инструмента ($C_{кр}$);

– для ЦЭФ в целом – это тарифная ставка рабочего (C_T), вспомогательное время операции ($T_{в}$).

3. Выходные параметры. Для ЦЭФ – себестоимость операции обработки кромки эластичным полимерно-абразивным инструментом.

Основное время обработки:

$$T_r = \frac{l_r}{S}, \quad (1)$$

где l_r – длина обрабатываемой кромки, мм;
 S – подача вдоль кромки, мм/мин.

Затраты на электроэнергию. Для выполнения операции зачистки поверхности затраты на расход электроэнергии в единицу времени работы зависят от требуемой мощности на процесс резания и стоимости 1 кВт·ч.

$$Z_{эл} = N_{эл} \cdot C_{эл},$$

где $C_{эл}$ – стоимость одного кВт·ч, руб; $N_{эл}$ – требуемая мощность привода, в кВт:

$$N_{эл} = 60 \cdot P_z \cdot \pi \cdot D_k \cdot n / 10^6.$$

Здесь P_z – тангенциальная сила резания, Н; D_k – диаметр инструмента, мм; n – частота вращения инструмента, мин^{-1} .

Стоимость эластичного полимерно-абразивного инструмента на выполнение операции. В процессе обработки кромки износ инструмента зависит от его интенсивности и продолжительности обработки. Стоимость изношенного инструмента на выполнение операции обработки кромки определяется по формуле:

$$C = \frac{C_{ш} \cdot l_{изн} \cdot T_r}{L_B \cdot K_{изн}},$$

где $C_{ш}$ – стоимость щетки, руб; $K_{изн}$ – коэффициент допустимого износа инструмента (рекомендуется $K_{изн} = 0,5$; $l_{изн}$ – длина изношенной части ворсины, мм; T_r – время обработки кромки по уравнению (1), мин; L_B – длина ворсины, мм.

Таким образом, разработанная система проектирования технологической операции обработки кромки эластичными полимерно-абразивными щетками позволяет назначать наиболее эффективные инструменты и рациональные режимные параметры обработки, а, следовательно, обеспечить требования НТД по качеству обработки, стабильность обработки при наибольшей производительности процесса и наименьшей себестоимости выполнения операции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система выдает оптимальные инструмент и режимы обработки в результате выполнения своих функций. При

реализации этой информации, в технологическом процессе изготовления детали, обеспечиваются требуемые показатели качества и оптимальная производительность.

Список литературы

1. Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М. Эффективная эксплуатация полимерно-абразивной щетки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2016. Вып. 73. С. 59–62.
2. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование качества поверхности при скруглении кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник Иркутского государственного технического университета. № 9. 2016. С. 23–34.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-23-34>
3. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Исследование производительности процесса скругления кромок полимерно-абразивными щетками // Вестник машиностроения. № 3. 2017. С. 74–78.
4. D'yakonov A.A., Shipulin L.V. Selecting the cutting conditions for plane grinding by the wheel periphery // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. No. 12. P. 814–816. <https://doi.org/10.3103/S1068798X14120119>
5. Дядя С.И., Гончар Н.В., Степанов Д.Н., Черный В.И., Алексеенко О.В. Обоснование выбора полимерно-абразивного инструмента для выполнения отделочных операций // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2010. № 2. С. 145–148.
6. Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. Geometrical errors of surfaces milled with con-vox and concave profile tools // Solid State Phenomena. 2018. Vol 284. P. 281–288.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281>
7. Fomin A.A. Microgeometry of surfaces after profile milling with the use of automatic cutting control system // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2017.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076117>
8. Li Ning, Ding Jinfu, Hu Liguang, Wang Xiao, Lu Lirong, Huang Jianmeng. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone GEL/SiC composites for elastic abrasive // Advanced Composites Letters. 2018. Vol. 27. Issue 3. P. 122–128.
<https://doi.org/10.1177/096369351802700305>
9. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимерабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 33. С. 106–108.
10. Степанов Д.Н. Влияние параметров полимерно-абразивного инструмента и режимов обработки на шероховатость поверхности титанового сплава BT8-M // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2012. № 2. С. 87–90.
11. Устинович Д.Ф. Экспериментальное исследование качества плоских поверхностей при обработке дисковыми абразивными щетками // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2009. № 8. С. 130–134.
12. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И. Зависимости мощности от режимов шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками // Механика машин, механизмов и материалов. 2012. № 1. С. 75–79.
13. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-2. С. 533–537.
14. Чапышев А.П., Стародубцева Д.А. Программный модуль назначения режимов финишной обработки с применением автоматических щеточных стационарных установок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение. 2016. Т. 18. № 2. С. 21–37.
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.2.02>
15. Xiaojun Wu, Zhu Chen, Tianze Zhou, Changjie Ma, Xiao Shu, Jianyuan Dong. Research on processing efficiency and contact characteristics of M300 steel surface grinding with elastic abrasives // Journal of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 54. Issue 1. P. 171–177.
<https://doi.org/10.3901/JME.2018.01.171>
16. Xiao-Jun Wu, Tian-Ze Zhou, Zhi-Xue Tong. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of M330 steel // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2017. Vol. 14. No. 11. P. 5372–5377.
<https://doi.org/10.1166/jctn.2017.6954>
17. Yuan Julong, Zhe Wu, Binghai L(U), Ducnam Nguyen, Huizong Lu, Ping Zhao. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface // Journal of Mechanical Engineering. 2012. Vol. 48. Issue 23. P. 167–177.
18. Яковлев Д.Р., Пини Б.Е. О взаимодействии волокон абразивно-полимерных щеток с обрабатываемой поверхностью // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2009. № 2. С. 184–187.
19. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
20. Болтянский В.Г. Оптимальное управление дискретными процессами. М.: Наука, 1973. 448 с.
21. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем / пер. с англ. И.Ф. Шахнова. М.: Мир, 1973. 344 с.
22. Новоселов Ю.К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. 304 с.
23. Острём К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ / пер. с англ. М.: Мир, 1987. 480 с.



References

1. Abrashkevych Yu, Machyshyn G. Effective use of the polymer-abrasive brush. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2016;73:59–62.
2. Dimov YuV, Podashev DB. Studying surface quality under edge rounding by polymeric and abrasive brushes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):23–34. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-23-34>
3. Dimov YuV, Podashev DB. Research of productivity of edge fillet process by polymer abrasive brushes. *Vestnik mashinostroeniya*. 2017;3:74–78. (In Russ.)
4. D'yakonov AA, Shipulin LV. Selecting the cutting conditions for plane grinding by the wheel periphery. *Russian Engineering Research*. 2014;34(12):814–816.
<https://doi.org/10.3103/S1068798X14120119>
5. Dyadya SI, Gonchar NV, Stepanov DN, Chernyi VI, Alekseenko OV. Validation of the polymer-abrasive fibers selection for finishing operations procession. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni = New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*. 2010;2:145–148.
6. Fomin AA, Gusev VG, Sattarova ZG. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools. *Solid State Phenomena*. 2018;284:281–288.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.281>
7. Fomin AA. Microgeometry of surfaces after profile milling with the use of automatic cut-ting control system. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2017.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076117>
8. Li Ning, Ding Jinfu, Hu Liguang, Wang Xiao, Lu Lirong, Huang Jianmeng. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone GEL/SiC composites for elastic abrasive. *Advanced Composites Letters*. 2018;27(3):122–128.
<https://doi.org/10.1177/096369351802700305>
9. Provolotcky A, Negrub S. Using polymer-abrasive elastic tools for finishing operations *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2006;33:106–108.
10. Stepanov DN. Influence of polymer-abrasive tool parameters and method of processing on the roughness of titanium alloy BT8-M surface. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni = New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*. 2012;2:87–90.
11. Ustinovich DF. Experimental study of flat surface quality when machining by disk abrasive brushes. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost'*. 2009;8:130–134.
12. Ustinovich DF, Pribylsky VI. Effect of processing conditions on power of grinding by polymeric-abrasive disk brushes. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2012;1:75–79.
13. Chapyshev AP, Ivanova AV, Kryuchkin AV. Technological capabilities of processes of details mechanized finishing processing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(6):533–537. (In Russ.)
14. Chapyshev AP, Starodubtseva DA. The program module designated processing conditions finishing employing automatic brushing stationary installation. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Mechanical Engineering, Materials Science*. 2016;18(2):21–37.
<https://doi.org/10.15593/2224-9877/2016.2.02>
15. Xiaojun Wu, Zhu Chen, Tianze Zhou, Changjie Ma, Xiao Shu, Jianyuan Dong. Research on processing efficiency and contact characteristics of M300 steel surface grinding with elastic abrasives. *Journal of Mechanical Engineering*. 2018;54(1):171–177.
<https://doi.org/10.3901/JME.2018.01.171>
16. Xiao-Jun Wu, Tian-Ze Zhou, Zhi-Xue Tong. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of M330 steel. *Journal of Computational and Theoretical Nano-science*. 2017;14(11):5372–5377.
<https://doi.org/10.1166/jctn.2017.6954>
17. Yuan Julong, Zhe Wu, Binghai L(U), Ducnam Nguyen, Huizong Lu, Ping Zhao. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface. *Journal of Mechanical Engineering*. 2012;48(23):167–177.
18. Yakovlev DR, Pini BE. On the issue of interaction between the abrasive polymer brush's fiber and the treating surfaces. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI = Izvestiya MGTU MAMI*. 2009;2:184–187. (In Russ.)
19. Buslenko NP. Modeling of complex systems. Moscow: Nauka; 1978, 400 p. (In Russ.)
20. Boltianskiy VG. *Optimal control of discrete processes*. Moscow: Nauka; 1973, 448 p. (In Russ.)
21. Mesarovich M, Mako D, Takahara I. Theory of hierarchical, multilevel, systems. 1973, 344 p. (Russ. ed.: *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem*. Moscow, Mir, 1973, 344 p.)
22. Novoselov YuK. Surface formation dynamics under abrasive treatment. Sevastopol: Sevastopol National Technical University; 2012, 304 p.
23. Astrom K, Wittenmark B. Computer-controlled systems, 1987, 480 p. (Russ. ed.: *Sistemy upravleniya s elektronno-vychislitel'noj mashinoy*, Moscow, Mir, 1987, 480 p.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Димов Юрий Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
и стандартизации в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: dimov-ura@yandex.ru

Подашев Дмитрий Борисович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования и стандартизации
в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: dbp90@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.03.2020; одобрена
после рецензирования 14.09.2020; принята к публика-
ции 21.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury V. Dimov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Designing
and Standardization in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: dimov-ura@yandex.ru

Dmitry B. Podashev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Designing
and Standardization in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: dbp90@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 27.03.2020; approved after
reviewing 14.09.2020; accepted for publication
21.12.2020.



Анализ прогрессивных технологий механообработки транспедикулярных винтов

© А.В. Савилов, А.С. Пятых, С.А. Тимофеев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – повышение эффективности процессов механической обработки транспедикулярных винтов из титановых сплавов на высокопроизводительном оборудовании на основе выбора прогрессивных технологических подходов, анализ современной технологии изготовления имплантов на станках с программным управлением типа токарный полуавтомат продольного точения. В качестве критериев оценки эффективности использовались производительность процесса, определяемая машинным временем, и качество обработки имплантов (шероховатость поверхности, геометрическая точность, механические свойства). Установлено, что токарные полуавтоматы продольного точения, оснащенные цанговой системой подачи прутка и приводными головками для вихревого нарезания резьбы, позволяют обрабатывать импланты типа транспедикулярного винта за один установ с максимальной эффективностью. Показано, что технология механообработки транспедикулярных винтов в значительной мере определяется особенностями их конструкции. Тип и форма резьбы оказывают наибольшее влияние на применяемый режущий инструмент и режимы резания. Анализ поломок винтов выявил, что основными причинами являются конструктивные дефекты и низкое качество обработки резьбовой части. Установлено, что применение метода вихревого нарезания резьбы позволяет получить резьбу за один проход и значительно повысить производительность обработки по сравнению с традиционной технологией без потери качества. Дополнительными преимуществами данного метода являются сокращение количества используемых инструментов и дополнительных финишных операций для удаления заусенцев. На основании проведенного анализа рекомендовано при изготовлении транспедикулярных винтов из титановых сплавов применять прогрессивные режущие инструменты – фрезы для вихревого резьбонарезания, обеспечивающие увеличение производительности процесса обработки в 4 раза без потери качества обрабатываемого изделия; снизить шероховатость поверхности до 2 раз, при этом уменьшится температура в зоне резания, что будет положительно влиять на ресурс обработанных изделий. Для эффективного применения указанных фрез необходимо оснащать используемые в технологическом процессе станки специальными приводными головками.

Ключевые слова: транспедикулярный винт, титановый сплав, режущий инструмент, многооперационные станки, вихревое резьбонарезание

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям России в рамках договора №3440ГС1/57422 от 18.02.2020 (код 0057422), заявка №С1-69876, конкурс Старт-19-1 (4 очередь).

Для цитирования: Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Анализ прогрессивных технологий механообработки транспедикулярных винтов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1190–1198. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198>

Analysis of advanced transpedicular screw machining technologies

Andrey V. Savilov, Aleksey S. Pyatykh, Sergey A. Timofeev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose is to improve the machining efficiency of titanium alloy transpedicular screws on high-performance machine-tools based on the selection of advanced technological approaches, and to analyze the current manufacturing technology of implants on CNC machines of the semi-automatic longitudinal turning lathe type. The efficiency is assessed using the following criteria: process performance determined by the machine time and the quality of implant processing (surface roughness, geometric accuracy, mechanical properties). It is found that semi-automatic longitudinal lathes equipped with a collet feed system and drive heads for thread whirling allow processing the implants of the transpedicular screw type in a single set-up with maximum efficiency. It is shown that the machining technology of transpedicular screws is largely determined by the features of their design. The type and shape of the thread have the greatest influence on the used cutting tool and cutting modes. The analysis of screw breakages revealed that the main failure reasons are design defects and poor machining quality of the threaded part. It is determined that the use of the thread whirling method makes it possible to obtain the thread in one cutting pass and, therefore, significantly increase the

machining performance compared to the traditional technology without any loss of quality. Additional advantages of this method are the reduction in the number of tools used and follow-on finishing deburring operations. Based on the conducted analysis the manufacture of transpedicular titanium alloy screws is recommended to perform using advanced cutting tools, primarily thread whirling cutters ensuring 4 times increase in machining performance without any loss of the processed item quality and 2 times reduced surface roughness. In this case the temperature in the cutting zone decreases, which has a positive effect on processed product service life. The condition for the effective use of the cutters is equipping of the machine-tools involved in the technological process with special drive heads.

Keywords: transpedicular screw, titanium alloy, cutting tools, multi-operational machines, thread whirling

Acknowledgements: The work is supported by the Russian Innovation Promotion Fund under the contract no. 3440ГC1/57422 of 18 February 2020 (code 0057422), application no. C1-69876, Start-19-1 competition (4th stage).

For citation: Savilov AV, Pyatykh AS, Timofeev SA. Analysis of advanced transpedicular screw machining technologies. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1190–1198. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198>

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие высокотехнологичной медицины зависит от научных и технических достижений в разных областях знаний. Одной из таких областей является технология машиностроения и одно из ее направлений – механообработка. Ключевое влияние на успехи медицины механообработка оказывает в травматологии, ортопедии и других направлениях, связанных с хирургическим вмешательством в организм пациента с последующей установкой протезов, имплантов и других подобных медицинских изделий.

Объем рынка ортопедических имплантов увеличивается с каждым годом в связи с совершенствованием технологий проведения медицинских операций и реабилитации пациентов. Также спрос на данный товар определяется снижением возраста пациентов, прибегающих к оперативному вмешательству, вызванному преждевременной трансформацией костной ткани в связи с нарушением питания и малоподвижным образом жизни. Эти факторы в полной мере относятся к транспедикулярным винтам, применяемым при операциях на позвоночнике. Одним из наиболее распространенных материалов для изготовления транспедикулярных винтов является титан. Так как титан относится к труднообрабатываемым материалам, при разработке технологических процессов изготовления винтов разработчики сталкиваются с типовыми проблемами: низкая стойкость инструмента, высокая температура в зоне резания, возникновение вибраций [1]. Особенности конструкции транспедикулярных вин-

тов усложняют решение указанных проблем. При этом в открытой печати практически отсутствуют работы, посвященные исследованию процесса механообработки транспедикулярных винтов и влиянию технологии обработки и режимов резания на функциональные качества изделия и его ресурс.

КОНСТРУКТИВНЫЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Существует несколько конструкций транспедикулярных винтов. Основные конструкции представляют собой винты с боковой фиксацией стержня и совмещающие узел фиксации с вертикальной укладкой стержня. Последние могут быть как моноаксиальными, то есть с жесткой осью резьбы, так и полиаксиальными, то есть с изменяющимся углом расположения резьбовой части (рис. 1).

С точки зрения изготовления конструкция моноаксиального винта (рис. 2 а) является более простой, однако для придания винту угла в оси корня дуги требуется чрезмерное растяжение краев раны. Конструкция полиаксиального винта (рис. 2 б) изначально предусматривает придание угла и не требует чрезмерного растяжения краев раны. При этом технологический процесс изготовления такого типа винта является более трудозатратным.

Конструкция поперечного сечения винта обычно представляет собой однозаходную или двухзаходную треугольную резьбу. В узле фиксации винта применяется треугольная или упорная резьба. Наконечник винта, как правило, закругленный.

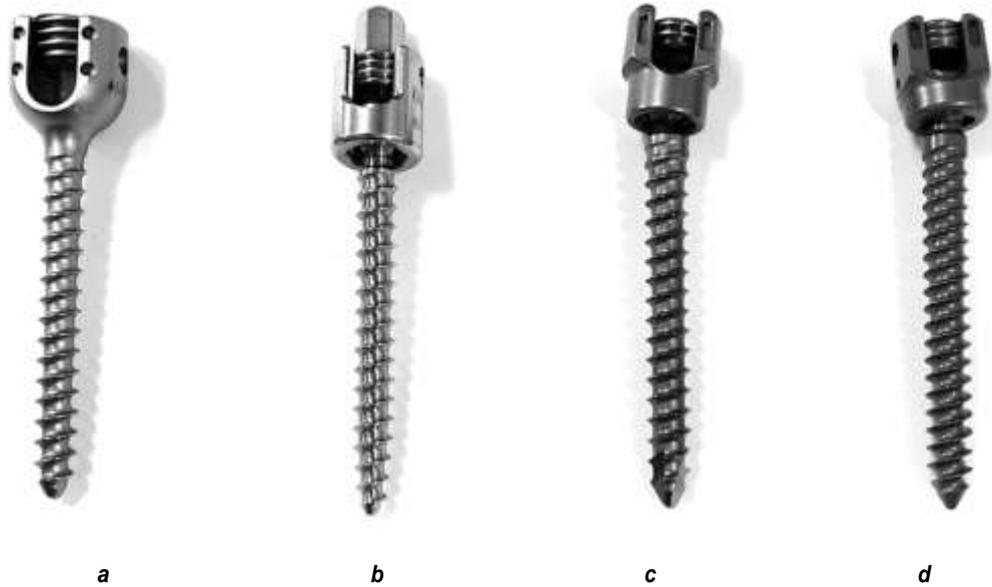


Рис. 1. Транспедикулярные винты: а – моноосиальный; б, с, d – полиосиальные
Fig. 1. Transpedicular screws: a – monoaxial; b, c, d – polyaxial

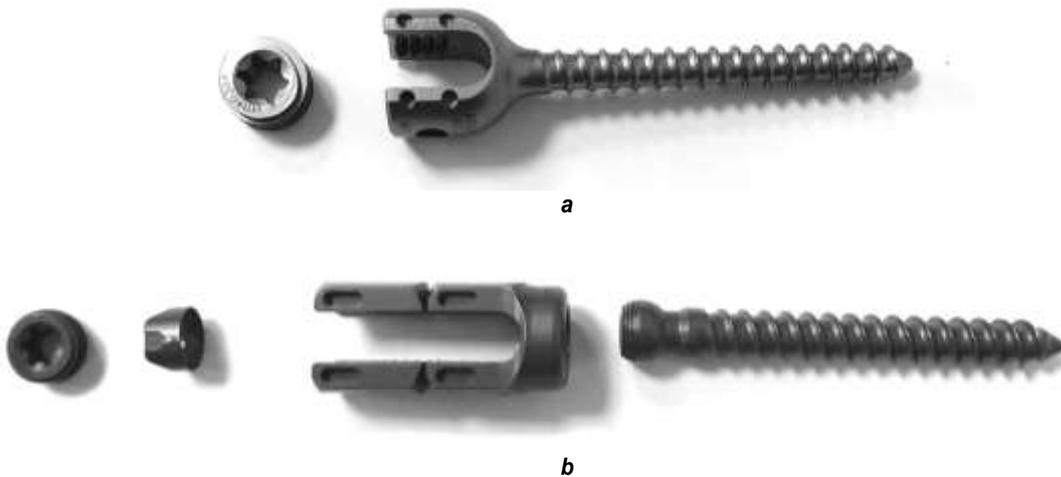


Рис. 2. Конструкция транспедикулярного винта: а – моноосиальный; б – полиосиальный
Fig. 2. Transpedicular screw design: a – monoaxial; b – polyaxial

В качестве конструкционного материала для изготовления рассмотренных винтов применяются титановые сплавы ВТ6 и ВТ1-0 или их зарубежные аналоги [2]. В некоторых случаях на эти сплавы наносится специальное покрытие, например на основе тантала [3]. Покрытие влияет на функциональные качества изделий, но не оказывает существенного влияния на технологию их изготовления.

В последнее время активно проводятся исследования по изготовлению винтов из композитных материалов, однако пока за-

метных преимуществ от использования подобных материалов не выявлено [4]. Это относится и к применению в качестве конструкционных материалов полимеров и керамики [5].

Эксплуатация аддитивных технологий, в частности электронно-лучевой плавки EBM (от англ. Electronic Beam Melting) материала, позволяет повысить производительность процесса. Однако произведенные подобным способом винты имеют худшие показатели при прохождении тестов на вытягивание, чем

произведенные методом обработки резанием изделия [6]. Существенным недостатком является увеличенная концентрация напряжений в поверхностном слое.

Дополнительные ограничения на конструкцию винта накладываются необходимостью прохождения пациентами регулярной процедуры компьютерной томографии. На объективность результатов томографии влияют форма, диаметр и тип покрытия транспедикулярного винта [7].

Форма винта также влияет и на другие важные параметры – силу вытягивания и жесткость. Согласно опубликованным исследованиям, винты конической формы имеют силу вытягивания на 17% больше, чем цилиндрические, а жесткость выше на 50% [8, 9].

Анализ причин поломок винтов показывает, что значительное влияние на прочность оказывают как конструктивные, так и технологические факторы. Например, недостаточный размер радиуса основания резьбы винта приводит к уменьшению усталостной прочности при изгибе с последующей поломкой (рис. 3 а) [10]. Но к аналогичным последствиям может привести и низкое качество обработанной поверхности (рис. 3 б). Как показывают исследования, проведенные рядом авторов, шероховатость обработанной резьбовой поверхности винта должна лежать в пределах параметра шероховатости $R_a = 1...2$ мкм [11, 12].

Классическая технология изготовления винтов, подобных винтам, показанным на рис. 1 и 2, предусматривает обработку на токарном обрабатывающем центре с привод-

ным инструментом и числовым программным управлением. Основными операциями при этом являются точение на проход и нарезание резьбы токарным резцом. Инструментальной промышленностью предлагаются высокопроизводительные инструменты для выполнения указанных операций. Однако применение подобной технологии приводит к ряду проблем. Ввиду низкой жесткости заготовки и обрабатываемого изделия возникают как вибрации, приводящие к ухудшению качества обрабатываемой поверхности и низкой стойкости инструмента, так и деформации детали, негативно сказывающиеся на точности ее формы. Ситуация усугубляется тем, что титановые сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам. Обработка резанием титановых сплавов сопровождается большими силами резания, высокой температурой в зоне резания, вибрациями. Указанные факторы приводят к ускоренному износу инструмента, низкому качеству обработанной поверхности, снижению ресурса, как изготавливаемого изделия, так и обрабатывающего оборудования [13, 14].

В настоящее время в ряде исследований предлагаются способы, позволяющие снизить негативное воздействие на процесс обработки титана вышеуказанных проблем. В частности, для борьбы с вибрациями предлагается метод модуляции скорости резания [15, 16]. Но данный метод не доведен до стадии промышленного использования ввиду отсутствия внятных рекомендаций по назначению параметров модуляции. Также представляет интерес метод модального анализа,

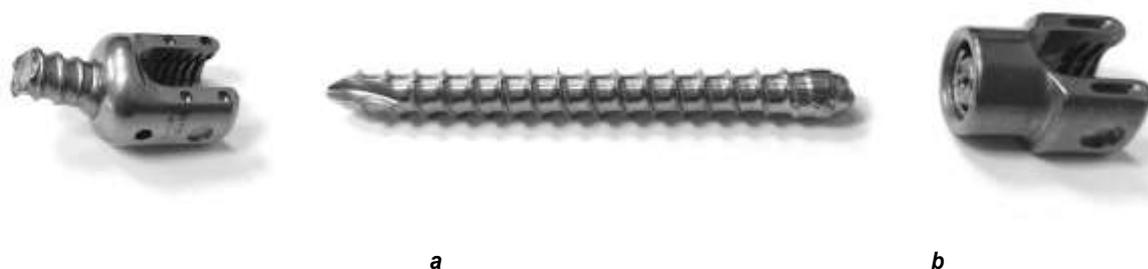


Рис. 3. Виды разрушений транспедикулярных винтов: а – поломка резьбовой части;
б – поломка у основания винта
Fig. 3. Destruction types of transpedicular screws: a – breakage of the threaded part;
b – breakage at the screw base



позволяющий определять области стабильного резания [17, 18]. Данный метод успешно применяется при обработке деталей средних и крупных габаритов, но для мелкогабаритной обработки его использование является проблематичным. Это объясняется малыми размерами, как заготовок, так и режущего инструмента, что затрудняет проведение теста по определению модальных параметров технологической системы.

В свою очередь, исследования, посвященные увеличению производительности лезвийной обработки титановых сплавов, могут успешно применяться при изготовлении транспедикулярных винтов, так как они базируются на выборе оптимальной геометрии режущей части инструмента [19] и на оптимизации режимов резания [20].

Принципиальным решением проблем, связанных как с конструкцией резьбовой части винта, так и с технологией ее обработки, является вихревое нарезание резьбы. Указанный процесс реализуется на токарных полуавтоматах продольного точения, оснащенных специальной приводной головкой (рис. 4). В качестве режущего инструмента ис-

пользуются фрезы со сменными многогранными пластинами (рис. 5). Данная технология обеспечивает следующими преимуществами по сравнению с традиционным нарезанием резьбы токарным резцом: получение высококачественной резьбы на длинных и тонких деталях, низкий риск возникновения вибрации и деформации, нарезание резьбы за один проход без предварительного снятия припуска, возможность обработки различных профилей, сокращение времени цикла и увеличение производительности, хороший контроль над стружкодроблением.

Схема вихревого резьбонарезания приведена на рис. 6. Глубина профиля создается путем движения рабочего органа в направлении + X. Подача осуществляется движением прутка через подающую цангу, вихревая головка при этом остается неподвижной. Возможно нарезание как правой, так и левой резьбы. За счет изменения угла наклона приводной головки появляется возможность увеличить шаг резьбы. Внутренняя подача эмульсии на режущие кромки повышает стойкость инструмента и улучшает эвакуацию стружки, что способствует улучшению

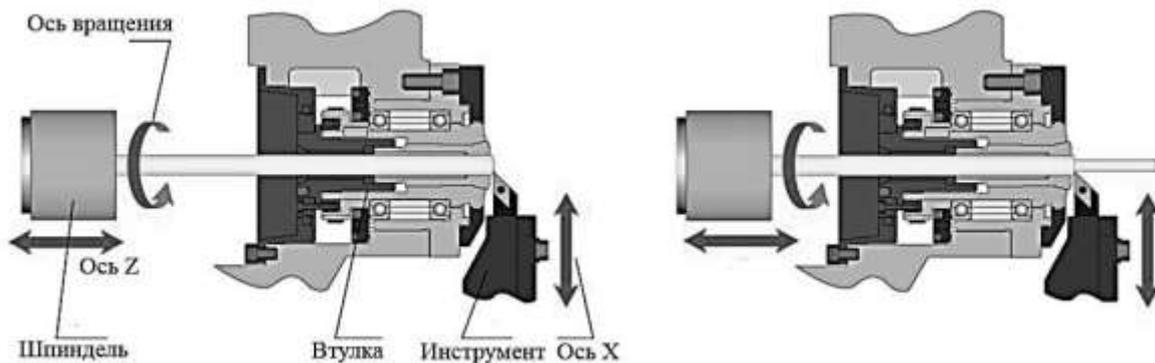


Рис. 4. Токарный станок продольного точения
Fig. 4. Sliding head lathe



Рис. 5. Фреза со сменными многогранными пластинами для вихревого нарезания резьбы
Fig. 5. Cutter with indexable inserts for thread whirling

качества обработанной поверхности. Достигается шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,135$ мкм и высокая точность изготовления профиля резьбы до 8 мкм. Анализ последних разработок в области вихревого резбонарезания показывает, что современный привод головки обеспечивает радиальное и осевое биения в пределах 3 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Высокая конкуренция на рынке имплантов делает применение классической технологии проблематичным и стимулирует производителей к применению инновационных технологических подходов.

В результате анализа установлено, что наиболее применимым материалом для изготовления транспедикулярных винтов является титановый сплав ВТ6 или его зарубежный аналог Ti_6Al_4V . Винты, изготовленные из композитов, полимеров или керамики, имеют более высокую стоимость и не обладают при этом серьезными преимуществами. В качестве титановых заготовок применяются горячекатаные прутки. Применение аддитивных технологий пока не получило широкого распространения ввиду невозможности в настоящее время устранения традиционных для этого процесса недостатков – высокой стоимости, низкого качества поверхности и небольшой по сравнению с лезвийной обработкой прочностью изделий. Исследования в данном направлении продолжаются и фоку-

сируются на комбинировании аддитивных технологий с различными видами механической обработки.

Оптимальным оборудованием для изготовления винтов являются токарные полуавтоматы с продольной подачей прутка при условии их соответствующей комплектации. Обязательным элементом такого станка является приводная головка для вихревого нарезания резьбы. Ключевым элементом технологического процесса является формирование резьбовой поверхности винта. Использование для выполнения этой операции специальных фрез со сменными многогранными пластинами позволяет повысить производительность обработки не менее чем в 2 раза, обеспечить точность формы до 8 мкм и шероховатость обработанной поверхности до $R_a = 0,137$ мкм. Также указанная технология позволяет избежать таких негативных явлений как разупрочнение поверхности в результате воздействия высоких температур и обеспечивает лучшее напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя. Однако следует иметь в виду, что технологические рекомендации по выбору геометрии сменных пластин, защитного покрытия и расчета режимов резания относятся к зарубежным титановым сплавам. Учитывая разницу в обрабатываемости резанием между зарубежными титановыми сплавами и их отечественными аналогами, требуются дополнительные исследования и опытные работы.

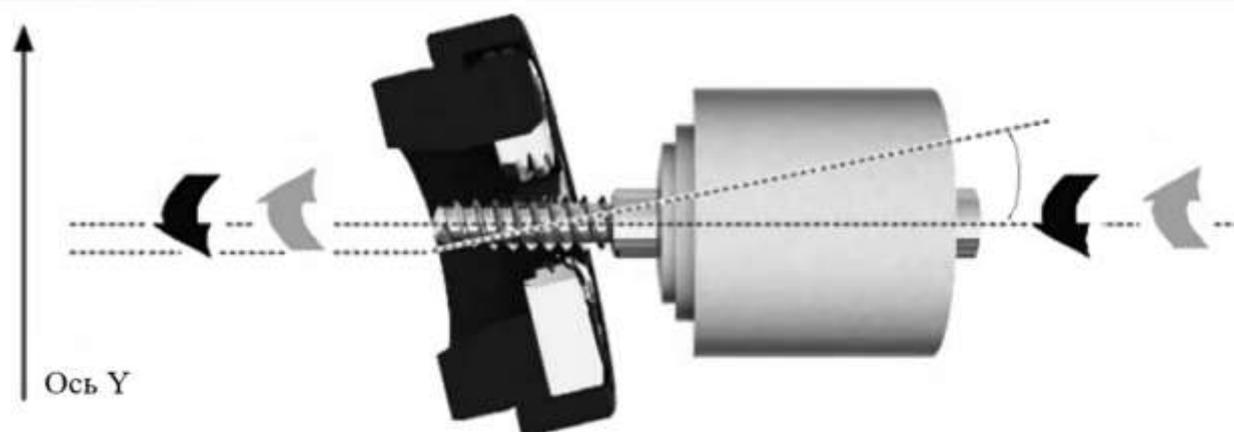


Рис. 6. Схема вихревого резбонарезания
Fig. 6. Thread whirling application scheme



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был выполнен конструктивный и технологический анализ транспедикулярных винтов, применяемых при операциях на позвоночнике. Рассмотрены особенности конструкции винтов и их влияние на функциональные свойства изделия. Выявлено, что механообработка винтов на токарных полуавтоматах продольного точения с приводной головкой для вихревого резьбонарезания обеспечивает максимальную производительность про-

цесса при заданном качестве изделия. Результаты анализа могут быть использованы при организации производства транспедикулярных винтов на базе отечественных машиностроительных предприятий.

Требуется проведение дополнительных исследований для разработки технологических рекомендаций по выбору инструмента и назначению режимов резания при использовании в качестве конструкционного материала отечественных титановых сплавов.

Список литературы

1. Savilov A.V., Svinin V.M., Timofeev S.A. Studies on titanium alloy turning rate improvement // Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. 2019. P. 1027–1033. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_109
2. Lam Tu-Ngoc, Trinh Minh-Giam, Huang Chih-Chieh, Kung Pei-Ching, Huang Wei-Chin, Chang Wei, et al. Investigation of bone growth in additive-manufactured pedicle screw implant by using Ti-6Al-4V and bioactive glass powder composite // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 21. Issue 20. <https://doi.org/10.3390/ijms21207438>
3. Shi Liang-Yu, Wang An, Zang Fa-Zhi, Wang Jian-Xi, Pan Xian-Wei, Chen Hua-Jiang, et al. Tantalum-coated pedicle screws enhance implant integration // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2017. Vol. 160. P. 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.08.059>
4. Becker Y.N., Motsch N., Hausmann J., Breuer U.P. Hybrid composite pedicle screw - finite element modelling with parametric optimization // Informatics in Medicine Unlocked. 2020. Vol. 18. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100290>
5. Kang Kyoung-Tak, Koh Yong-Gon, Son Juhyun, Yeom Jin S., Park Joon-Hee, Kim Ho-Joong. Biomechanical evaluation of pedicle screw fixation system in spinal adjacent levels using polyetheretherketone, carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone, and traditional titanium as rod materials // Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 130. P. 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.052>
6. Rosa G., Clienti C., Mineo R., Audenino A. Experimental analysis of pedicle screws // Procedia Structural Integrity. 2016. Vol. 2. P. 1244–1251. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.159>
7. Le Cann S., Tudisco E., Turunen M.J., Patera A., Mokso R., Tägil M., et al. Investigating the mechanical characteristics of bone-metal implant interface using in situ synchrotron tomographic imaging // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2019. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00208>
8. Abshire B.B., McLain R.F., Valdevit A., Kambic H.E. Characteristics of pullout failure in conical and cylindrical pedicle screws after full insertion and back-out // Spine Journal. 2001. Vol. 1. Issue 6. P. 408–414. [https://doi.org/10.1016/S1529-9430\(01\)00119-X](https://doi.org/10.1016/S1529-9430(01)00119-X)
9. Shea T.M., Laun J., Gonzalez-Blohm S.A., Doulergis J.J., Lee William E., Aghayev K., et al. Designs and techniques that improve the pullout strength of pedicle screws in osteoporotic vertebrae: current status // BioMed Research International. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/748393>
10. Kubiak A.J., Lindqvist-Jones K., Dearn K.D., Duncan E.T. Shepherd. Comparison of the mechanical properties of two designs of polyaxial pedicle screw // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 95. P. 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.08.023>
11. Kemény A., Hajdu I., Károly D., Pammer D. Osseointegration specified grit blasting parameters // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. Issue 13. Part 2. P. 26622–26627. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.126>
12. Wu D., Spanou A., Diez-Escudero A., Persson C. 3D-printed PLA/HA composite structures as synthetic trabecular bone: a feasibility study using fused deposition modeling // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2020. Vol. 103. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103608>
13. Balaji J.H., Krishnaraj V., Yogesvaraj S. Investigation on high speed turning of titanium alloys // Procedia Engineering. 2013. Vol. 64. P. 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.169>
14. Krainev D.V., Polyanchikova M.Yu., Bondarev A.A. Influence of the surface layer characteristics on the regularities of the cutting process // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Web of Conferences. 2017. No. 3. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901045>
15. Altintas Y., Chan P.K. In-process detection and suppression of chatter in milling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1992. Vol. 32. Issue 3. P. 329–347. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(92\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0890-6955(92)90006-3)
16. Svinin V.M., Astakhov D.M. Control of self-excited vibrations in face milling with two-rim mill // Control of self-excited vibrations in face milling with two-rim mill: Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 632.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012111>
17. Roukema J.C., Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. Vol. 47. Issue 9. P. 1455–1473.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005>
18. Roukema J.C., Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part II: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. Vol. 47. Issue 9. P. 1455–1485.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.006>
19. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P., Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatykh A.S. Research Results Of Stress-Strain State Of Cutting Tool When Aviation Materials Turning // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 944. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>
20. Budak E., Kops L. Improving Productivity and Part Quality in Milling of Titanium Based Impellers by Chatter Suppression and Force Control // *CIRP Annals*. 2000. Vol. 49. Issue 1. P. 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62890-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62890-X)

References

1. Savilov AV, Svinin VM, Timofeev SA. Studies on titanium alloy turning rate improvement. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering*. 2019;1027–1033. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_109
2. Lam Tu-Ngoc, Trinh Minh-Giam, Huang Chih-Chieh, Kung Pei-Ching, Huang Wei-Chin, Chang Wei, et al. Investigation of bone growth in additive-manufactured pedicle screw implant by using Ti-6Al-4V and bioactive glass powder composite. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(20). <https://doi.org/10.3390/ijms21207438>
3. Shi Liang-Yu, Wang An, Zang Fa-Zhi, Wang Jian-Xi, Pan Xian-Wei, Chen Hua-Jiang, et al. Tantalum-coated pedicle screws enhance implant integration. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2017;160:22–32. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.08.059>
4. Becker YN, Motsch N, Hausmann J, Breuer UP. Hybrid composite pedicle screw – finite element modelling with parametric optimization. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2020;18. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100290>
5. Kang Kyoung-Tak, Koh Yong-Gon, Son Juhyun, Yeom Jin S., Park Joon-Hee, Kim Ho-Joong. Biomechanical evaluation of pedicle screw fixation system in spinal adjacent levels using polyetheretherketone, carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone, and traditional titanium as rod materials. *Composites Part B: Engineering*. 2017;130:248–256. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.052>
6. Rosa G, Clienti C, Mineo R, Audenino A. Experimental analysis of pedicle screws. *Procedia Structural Integrity*. 2016;2:1244–1251. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.159>
7. Le Cann S, Tudisco E, Turunen MJ, Patera A, Mokso R, Tägil M, et al. Investigating the mechanical characteristics of bone-metal implant interface using in situ synchrotron tomographic imaging. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00208>
8. Abshire BB, McLain RF, Valdevit A, Kambic HE. Characteristics of pullout failure in conical and cylindrical pedicle screws after full insertion and back-out. *Spine Journal*. 2001;1(6):408–414. [https://doi.org/10.1016/S1529-9430\(01\)00119-X](https://doi.org/10.1016/S1529-9430(01)00119-X)
9. Shea TM, Laun J, Gonzalez-Blohm SA, Dougeris JJ, Lee William E, Aghayev K, et al. Designs and techniques that improve the pullout strength of pedicle screws in osteoporotic vertebrae: current status. *BioMed Research International*. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/748393>
10. Kubiak AJ, Lindqvist-Jones K, Dearn KD, Duncan ET, Shepherd. Comparison of the mechanical properties of two designs of polyaxial pedicle screw. *Engineering Failure Analysis*. 2019;95:96–106. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.08.023>
11. Kemény A, Hajdu I, Károly D, Pammer D. Osseointegration specified grit blasting parameters. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(13-2):26622–26627. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.126>
12. Wu D, Spanou A, Diez-Escudero A, Persson C. 3D-printed PLA/HA composite structures as synthetic trabecular bone: a feasibility study using fused deposition modeling. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;103. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103608>
13. Balaji JH, Krishnaraj V, Yogesvaraj S. Investigation on high speed turning of titanium alloys. *Procedia Engineering*. 2013;64:926–935. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.169>
14. Krainev DV, Polyanchikova MYu, Bondarev AA. Influence of the surface layer characteristics on the regularities of the cutting process. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Web of Conferences*. 2017;129(3). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901045>
15. Altintas Y, Chan PK. In-process detection and suppression of chatter in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1992;32(3):329–347. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(92\)90006-3](https://doi.org/10.1016/0890-6955(92)90006-3)
16. Svinin VM, Astakhov DM. Control of self-excited vibrations in face milling with two-rim mill. In: *Control of self-excited vibrations in face milling with two-rim mill: Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012111>
17. Roukema JC, Altintas Yu. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(9):1455–1473. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005>
18. Roukema JC, Altintas Yu. Generalized modeling of



drilling vibrations. Part II: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(9):1455–1485.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.10.006>

19. Serebrennikova AG, Nikolaeva EP, Savilov AV, Timofeev SA, Pyatykh AS. Research results of stress-strain

state of cutting tool when aviation materials turning. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>

20. Budak E, Kops L. Improving productivity and part quality in milling of titanium based impellers by chatter suppression and force control. *CIRP Annals*. 2000;49(1):31–36. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62890-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62890-X)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Савилов Андрей Владиславович,

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

Пятых Алексей Сергеевич,

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

Тимофеев Сергей Анатольевич,

младший научный сотрудник кафедры технологии
и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: sevans@ex.istu.edu

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 05.09.2020; одобрена после рецензирования 09.11.2020; принята к публикации 15.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Savilov,

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

Aleksey S. Pyatykh,

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

Sergey A. Timofeev,

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

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 05.09.2020; approved after reviewing 09.11.2020; accepted for publication 15.12.2020.



Установка физического моделирования ветровой нагрузки на крановые конструкции

© Л.А. Сладкова, В.В. Крылов, Ф.А. Кузнецов

Российский университет транспорта, г. Москва, Россия

Резюме: Цель – воспроизведение нормативного ветрового потока (ламинарный, турбулентный, пульсационный режимы) для изучения воздействия на крановые конструкции, позволяющее получить значения нагруженности элементов крана, максимально приближенные к реальным условиям. При создании установки, относящейся к области экспериментальной аэродинамики, был принят «принцип имитации основных факторов, определяемых условиями эксплуатации объекта исследования», для обеспечения воспроизводимости результатов испытаний в максимальной степени. Для подтверждения работоспособности предлагаемого устройства установки, была разработана ее компьютерная модель с использованием программного продукта системы автоматизированного проектирования SolidWorks. Параметры компьютерной модели находятся в полном геометрическом соответствии с размерами разработанной реальной установки. Использование установки позволяет исследовать динамическое воздействие ветра на устойчивость крановых конструкций в различных режимах эксплуатации (изменение скорости ветра, в режиме работы с грузом, в условиях работы у пристенка и т.д.). Предложенная установка позволяет моделировать нагрузки на крановое оборудование с возможностью расширения характеристик, например, его грузоподъемности. Сформированная компьютерная модель установки позволяет выявить физическую картину распределения ветрового потока на выходе из установки. Результаты моделирования ветрового потока на предлагаемой установке подтверждены на компьютерной модели с высокой степенью сходимости результатов при скоростях ветра от 2,5 м/с и ниже. Предлагаемая авторами установка позволит моделировать величину реальной среднестатистической ветровой нагрузки различной интенсивности, пульсационную составляющую ветровой нагрузки, вихревое возбуждение, повышение доступной возможности аэродинамических исследований для реальной крановой конструкции. Разработанная установка представляет собой устройство для тарировки внешних воздействий от силы ветра на конструкцию крана.

Ключевые слова: установка, физическое моделирование, ветровая нагрузка, крановые конструкции

Для цитирования: Сладкова Л.А., Крылов В.В., Кузнецов Ф.А. Установка физического моделирования ветровой нагрузки на крановые конструкции. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1199–1208. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1199-1208>

Installation of physical simulation of wind load on crane structures

Lyubov A. Sladkova, Vadim V. Krylov, Filipp A. Kuznetsov

Russian University of Transport, Moscow, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to reproduce a standard wind flow (laminar, turbulent, pulsating modes) to study the impact on crane structures, with the aim to obtain the load values of crane elements most closely approximate to real conditions. When creating an installation, which is related to the field of experimental aerodynamics, the "principle of simulating the main factors determined by the operating conditions of the research object" is adopted to ensure the reproducibility of test results to the maximum extent. To confirm the performance efficiency of the proposed installation device, its computer model is developed using the CAD software SolidWorks. The computer model parameters are in full geometric agreement with the dimensions of the developed real installation. The use of the installation makes it possible to study the dynamic effect of the wind on the stability of crane structures in various operation modes (change in wind speed, in the mode of load operation, in operation conditions at the wall, etc.). The proposed installation allows to simulate the loads on crane equipment with the possibility of characteristics expanding, for example, its carrying capacity. The generated computer model of the installation makes it possible to reveal the physical picture of wind flow distribution at the installation outlet. The results of wind flow simulation on the proposed installation are confirmed on a computer model with a high degree of convergence of results at wind speeds of 2.5 m/s and lower. The installation proposed by the authors will allow to simulate: the value of the real average statistical wind load of various intensity; pulsating component of the wind load; vortex excitation; increase of the available aerodynamic research capability for a real crane structure. The

developed installation is a calibration device for external impacts of the wind force on the crane structure.

Keywords: installation, physical simulation, wind load, crane structures

For citation: Sladkova LA, Krylov VV, Kuznetsov FA. Installation of physical simulation of wind load on crane structures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1199–1208. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1199-1208>

ВВЕДЕНИЕ

Действие ветровой нагрузки на крановые конструкции не теряет своей актуальности в силу многофакторности изменения самой ветровой нагрузки как любого природного явления. Нормативными документами (ГОСТ Р 56728-2015¹, ГОСТ 1451-77²) предусмотрена методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции и сооружения. Однако практика их эксплуатации показывает, что, несмотря на учет этих нормативов, «кранопадение» от действия ветра в результате потери устойчивости имеет место быть во многих регионах России и мира (частное происшествие в Гомеле³). Следует отметить, что потеря устойчивости крановых конструкций происходит не только в результате действия ветра^{2,3} [1–3], но и при работе на неустойчивых (слабонесущих) грунтах [4–7]. В трудах [1–3] авторы рассматривают действие ветровой нагрузки на груз самоходных строительных кранов (ССК) при скоростях ветра от 0 до 20 м/с, исходя из условий динамического равновесия, в различных условиях эксплуатации, хотя практика эксплуатации утверждает, что падение кранов может происходить даже в ненагруженном состоянии.

Назначение любой экспериментальной установки направлено на достоверное воспроизведение внешних факторов на испытываемое изделие и получение максимально точных измерений контролируемых парамет-

ров этого изделия. Создание экспериментальной установки, воспроизводящей реальную ветровую нагрузку, основано на формировании нормативного ветрового потока (ГОСТ Р 56728-2015¹) в соответствующем уменьшенном линейном масштабе на изделие. Как правило, для этих целей используют аэродинамические трубы – устройства, предназначенные для моделирования воздействия среды на движущиеся в ней тела. Применение труб в аэродинамике базируется на принципе обратимости движений и теории подобия физических явлений⁴ [8, 9]. Аэродинамические трубы (испытательные стенды⁵) [10, 11] предназначены для изучения аэродинамических воздействий на здания, сооружения и их элементы, весового эксперимента, диапазона возможных значений составляющих аэродинамической (силы и момента) и для изучений аэродинамических характеристик крыла летательного аппарата. Все установки отличаются громоздкостью и высокой стоимостью и необходимы для стационарных исследований конструкций и сооружений [12, 13] авиационной и ракетной отрасли исследований двигателей и аэродинамических характеристик летательных аппаратов (отчет Научно-исследовательского института механики⁶).

Сказанное позволило сформулировать цель исследований: создание экспериментальной установки для воспроизведения

¹ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции. Введ. 01.05.2016. М.: Стандартинформ, 2019.

²ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и методы определения. Введ. 01.01.1978. М.: Изд-во стандартов, 2003.

³Фотофакт: на улице Интернациональной перевернулся автокран // Гомельская правда [Электронный ресурс]. URL: <https://gp.by/category/news/crime/news117576.html> (05.03.2020).

⁴Аэродинамическая труба // Большая советская энциклопедия: в 30 т. / гл. ред. А.М. Прохоров. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

⁵Испытательный стенд «Аэродинамическая труба». [Электронный ресурс]. URL: http://mgsu.ru/customer/Подразdeleniya/Aerodinamika_i_aeroakustika/Oborudovaniye (05.03.2020).

⁶Отчет о научно-исследовательской работе (шифры темы по плану НИР института: 5.3; 01201152147). К определению ветровых нагрузок на пролетную конструкцию вантового моста / В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, Науч.-иссл. ин-т механики, 2015. 37 с.



нормативного ветрового потока изучения воздействия на крановые конструкции (ламинарный, турбулентный, пульсационный режимы). Решением этой задачи занимаются ученые и специалисты ведущих научных объединений России и зарубежья, используя для этих целей научно и экспериментально обоснованные руководства [14], в которых изложены принципы проектирования и расчета испытательных стендов ракетных двигателей и объектов ракетно-космической техники. Для создаваемой нами установки интересен «принцип имитации основных факторов, определяемых условиями эксплуатации объекта исследования», так как она относится к области экспериментальной аэродинамики и должна в максимальной степени обеспечивать воспроизводимость результатов испытаний.

Разработанные национальные стандарты Российской Федерации по методам аэродинамических испытаний направлены в большей степени на решение экологических задач в области аэродинамических характеристик объектов и сооружений. Например, ГОСТ Р 56077-2014⁷ устанавливает требования к методам аэродинамических испытаний конструкций и оборудования противодымной защиты зданий.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Проанализированный статистический материал аварий на кранах позволяет сделать вывод о том, что существующие методы расчета крановых конструкций с учетом действия ветровой нагрузки являются расчетным инструментом, исходными данными для которых должны являться изменение силовых характеристик давления ветра различной интенсивности и характера.

Оценку влияния давления ветра на устойчивость кранов, работающих на открытом воздухе, в настоящее время проводят согласно ГОСТ 1451-77².

Задача создания установки для моделирования потока ветра связана с его воздей-

ствием на крановые конструкции, как одного из основных факторов внешнего воздействия, учет которого определяет устойчивую работу крана. Совершенно очевиден факт падения кранов в результате действия ветровой нагрузки из-за отсутствия действительного распределения потока ветра на конструкцию при различных условиях его эксплуатации. Созданная установка позволит моделировать:

- величину реальной среднестатистической ветровой нагрузки различной интенсивности;
- пульсационную составляющую ветровой нагрузки;
- вихревое возбуждение;
- повышение доступной возможности аэродинамических исследований для реальной крановой конструкции.

Основной причиной является сложность прогнозировать ветер, вызванный определенными метеорологическими процессами: штормовые порывы и пульсацию.

Предлагаемая установка (рис. 1, 2) соответствует параметрам модели испытываемой конструкции стрелового крана в масштабе 1 к 20. Все линейные размеры были уменьшены на размер масштаба (в 20 раз), площади уменьшены в квадрат масштаба (в 400 раз).

Конструкция состоит из корпуса 1 (см. рис. 1), представляющего собой герметичный сплошностенчатый прямоугольный короб, выполненный из трехслойной шлифованной фанеры толщиной 4 мм (ГОСТ 3916.1-96⁸), на задней стенке которого размещены четыре параллельно соединенных вентилятора 5 (кулер Glacial Tech IceWind 14025). Короб для исключения действия на воздушный поток эффекта основания установлен на высоте 0,5 м на подставке 2. Передняя стенка короба снабжена регулируемыми по ширине зазора от 10 до 150 мм шторками 3, что позволяет (в соответствии с законами аэродинамики) регулировать величину давления пото-

⁷ГОСТ Р 56077-2014. Методы аэродинамических испытаний конструкций и оборудования противодымной защиты зданий. Введ. 01.03.2015. М.: Стандартинформ, 2019.

⁸ГОСТ 3916.1-96. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Введ. 01.01.1998. М.: Изд-во стандартов, 1999.

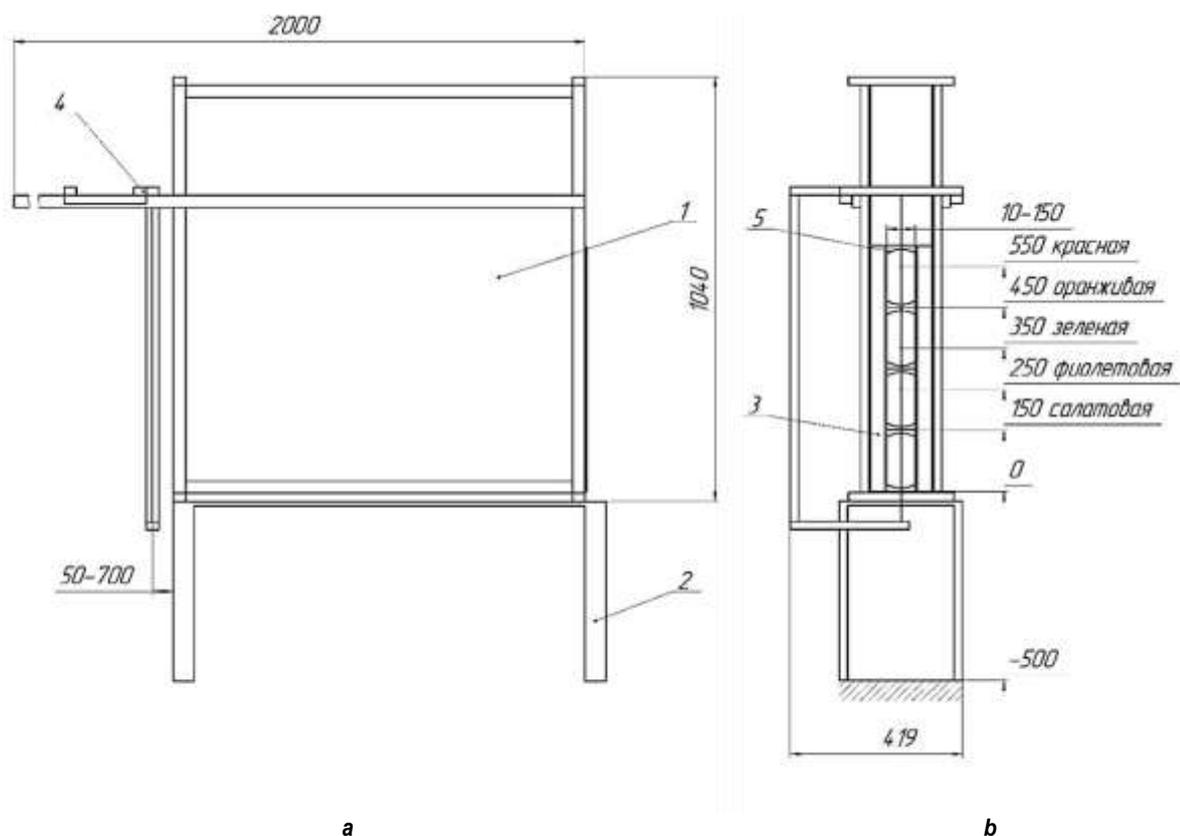


Рис. 1. Установка физического моделирования ветрового потока:
 1 – корпус; 2 – подставка; 3 – регулируемые шторы;
 4 – каретка с С-образной скобой для размещения «датчиков»; 5 – вентилятор
 Fig. 1. Installation of wind flow physical simulation: 1 – body; 2 – support unit; 3 – adjustable curtains;
 4 – carriage with a C-shaped bracket for "sensors" placing; 5 – fan

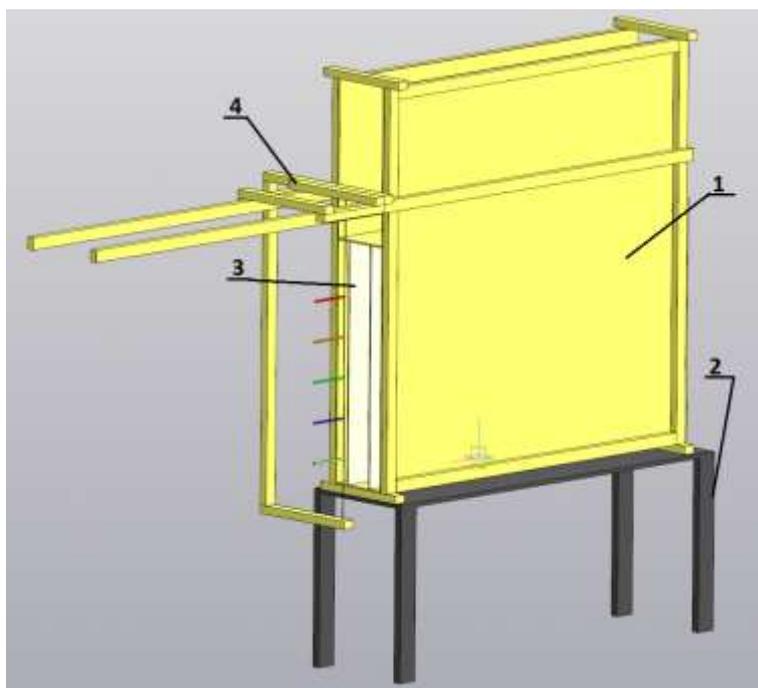


Рис. 2. Установка физического моделирования ветрового потока
 (аксонометрическое изображение)
 Fig. 2. Installation of wind flow physical simulation (an axonometric view)

ка ветра. К передней стенке корпуса крепится каретка 4 с С-образной скобой, на которой в вертикальной плоскости натянута леска диаметром 1 мм. На леске размещены «датчики», позволяющие фиксировать изменение потока ветра. Щель между шторками образует проход сложной формы (рис. 3), состоящий из двух частей. Первая часть – это сужение в виде конуса, у которого может изменяться угол между его осью и образующей конуса в интервале от 0 до 42°, при этом длина сужения меняется от 73 до 100 мм. Вторая часть представляет собой канал с прямолинейными направляющими (ограничение вертикально расположенными по вы-

соте короба плоскостями). Ширина канала может изменяться в зависимости от угла наклона образующей конусного сужения от 10 до 150 мм и при фиксированной длине равной 100 мм.

Такая форма прохода позволяет изучить давление ветра, дующего с переменной скоростью с учетом имитации ветровых нагрузок, максимально приближенным к условиям реальных испытаний, т.е. высоты конструкции.

Регулирование щели осуществляется вручную в зависимости от достижения желаемой скорости ветра, расчетные и экспериментальные величины которого приведены в таблице.

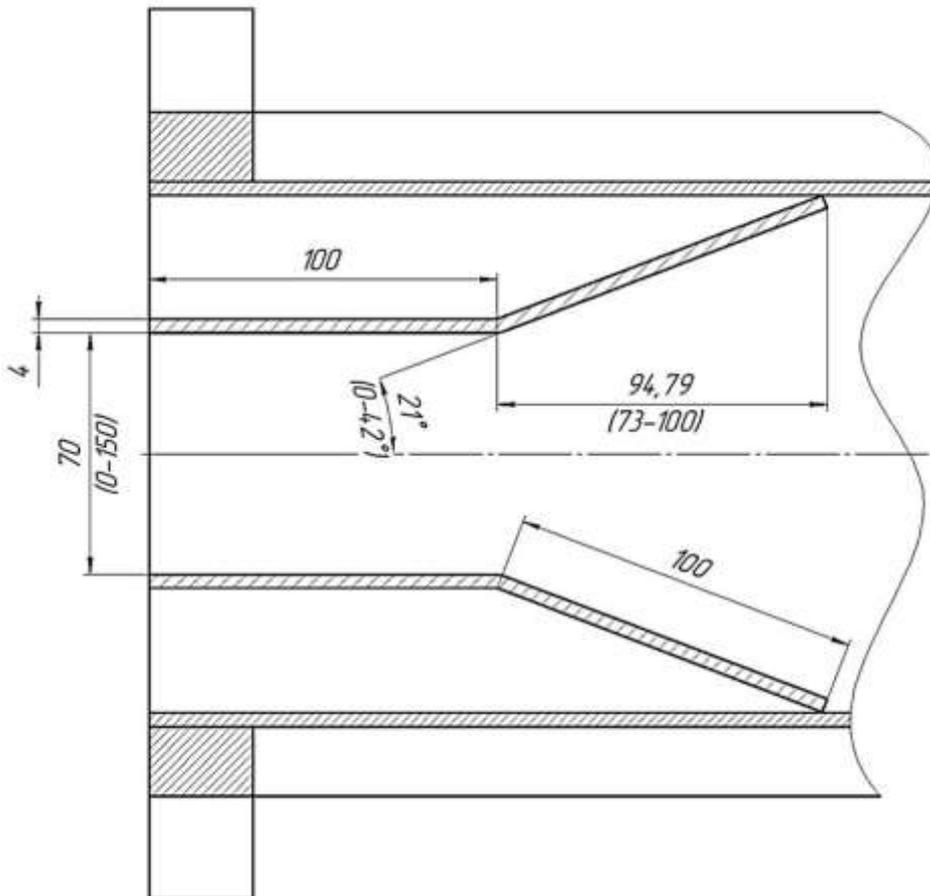


Рис. 3. Форма регулируемой щели
Fig. 3. Shape of the adjustable slit

Изменение скорости ветра на выходе из щели установки
Wind speed variation at the outlet from the installation slit

Скорость ветра, м/с	Размер щели а, мм	10	30	50	70	90	110	130	150
Расчетная		16,12	5,37	3,22	2,30	1,79	1,47	1,24	1,07
Эксперимент		2,17	2,45	2,93	2,23	1,72	1,55	1,25	1,03

Расчетную величину скорости V (м/с) воздушного потока определим по зависимости (1)⁹ [15]:

$$V = \frac{L}{3600F_{CT}}, \quad (1)$$

где L – расход воздуха, м³/ч; F_{CT} – площадь живого сечения щели, м².

Расход воздуха L через установку от четырех кулеров равен 348,22 м³/ч.

Создание ветрового напора (скорость на выходе установки измерялась с помощью флюгера Вильда) в установке осуществляется четырьмя параллельно установленными вентиляторами¹⁰ типа IceWind 14025, фирмы GlacialTech, мощностью 2,16 Вт (поменяв на вентиляторы с другим расходом воздуха, можно изменить скорость воздушного потока на выходе установки с требуемым диапазоном) и числом оборотов по паспортным данным производителя 1000 об/мин ± 250 об/мин. Реальные замеры тахометром показали, что число оборотов при вращении вентилятора составляет 1400 ± 40 об/мин. Параллельное соединение вентиляторов позволяет не только увеличить подачу воздуха, но и регулировать производительность в ветвях создаваемой системы.

Вентиляторы с диаметром лопастей 140 мм расположены на равном расстоянии (600 – 140·4)/3 = 13 мм друг от друга, что позволяет создавать равномерность потока воздуха, сформированного четырьмя вентиляторами. Длина короба 1000 мм выбиралась из условия формирования ламинарного потока перед испытываемым образцом.

Основанием для получения достоверных данных при использовании предлагаемой установки является математическое моделирование процессов, протекающих в установке. Моделирование нагрузок автокрана и возможность расширения его характеристик

грузоподъемности [16, 17], методика автоматизированного построения математической модели стрелового грузоподъемного крана [18] связаны в основном с обеспечением грузовой устойчивости кранов.

Аналогичная установка, выполненная в компьютерном варианте (рис. 4), была разработана с целью выявления характера формирования ветрового потока на выходе из установки. Модель компьютерной установки была создана в полном геометрическом соответствии с размерами разработанной установки, что с высокой степенью достоверности предполагает получение данных, которые составят основу проведения экспериментальных исследований. Моделирование потока осуществлялось в программном продукте SolidWorks¹¹ [19–21] с использованием критерия подобия – числом Рейнольдса Re .

Встроенные в компьютерной модели вентиляторы не являются идеальными, а моделируют создание воздушного потока в соответствии с исходными данными вентиляторов, выбранных для физической модели, показанной на рис. 1 и 2 (частота вращения, расход воздуха и т.д.). Тип потока через крыльчатку вращающегося вентилятора был выбран как ламинарный и турбулентный (интенсивность турбулентности 0,1%, масштаб турбулентности 0,00158 м).

Примерно через 2 с после начала формирования потока можно наблюдать по нижней шкале, что ламинарный режим начинается на расстоянии 200–300 мм, и на выходе из щели (10 мм) скорость достигает 0,888 м/с. Вентиляторы в этом варианте неидеальные встроенные (есть модель).

На рис. 4 видно, что по мере удаления от вентиляторов, завихрения воздуха сглаживаются, и линии тока потока воздуха выпрямляются, образуя ламинарный поток.

Полученные величины изменения скорости потока воздуха в зависимости от размера щели, полученные на компьютерной модели

⁹Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б., Байбаков О.В., Кирилловский Ю.Л. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.

¹⁰Параллельное соединение вентиляторов [Электронный ресурс]. URL: <https://engineerishka.ru/ventilyaciya/parallelnoe-soedinenie-ventilyatorov.html> (14.07.2020).

¹¹Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. М.: Бинوم, 2004. 289 с.

установки, внесены в таблицу (см. строку «эксперимент»). Очевиден факт близкой корреляции полученных результатов, что свидетельствует о достоверности цифровых значений интенсивности ветрового потока, разрабатываемой разработанной установкой. Отличие эксперимента и расчета объясняется тем, что формула для расчета скорости «идеальная»: нет учета потерь на стенках (чем меньше щель, тем они более ощутимы).

Колебания воздушного потока (величину реальной среднестатистической ветровой нагрузки различной интенсивности, пульсационную составляющую ветровой нагрузки, вихревое возбуждение) на выходе из щели предлагается определять классическим методом¹² [22] путем размещения на вертикальной стойке С-образной скобы «датчиков» из шелковых нитей. Такой вид «датчиков» широко распространен при испытании самолетов при оценке обтекания профиля крыла набегающим потоком воздуха.

Для фиксирования изменения потока воздуха по высоте профиля нити на стойке ско-

бы размещались на расстоянии 150 мм друг от друга и имели разный цвет (см. рис. 1). По их отклонениям можно судить об изменениях давления ветра на конструкцию, характере обтекания крана при любом его положении и любом размещении груза. Применение предлагаемых средств измерения и оценки величины и характера изменения силы ветра позволят контролировать процесс визуально.

Таким образом, разработанная установка представляет собой устройство для тарировки внешних воздействий от силы ветра на конструкцию крана. При проведении эксперимента можно будет получить наглядную картину распределения скорости воздушного потока, давления и возникающей аэродинамики (турбулентности) вблизи крановой конструкции, выявить причину потери устойчивости кранов от действия ветровой нагрузки и получить реальные расчетные зависимости, позволяющие рекомендовать проводить корректировку расчета кранов на ветровую нагрузку.

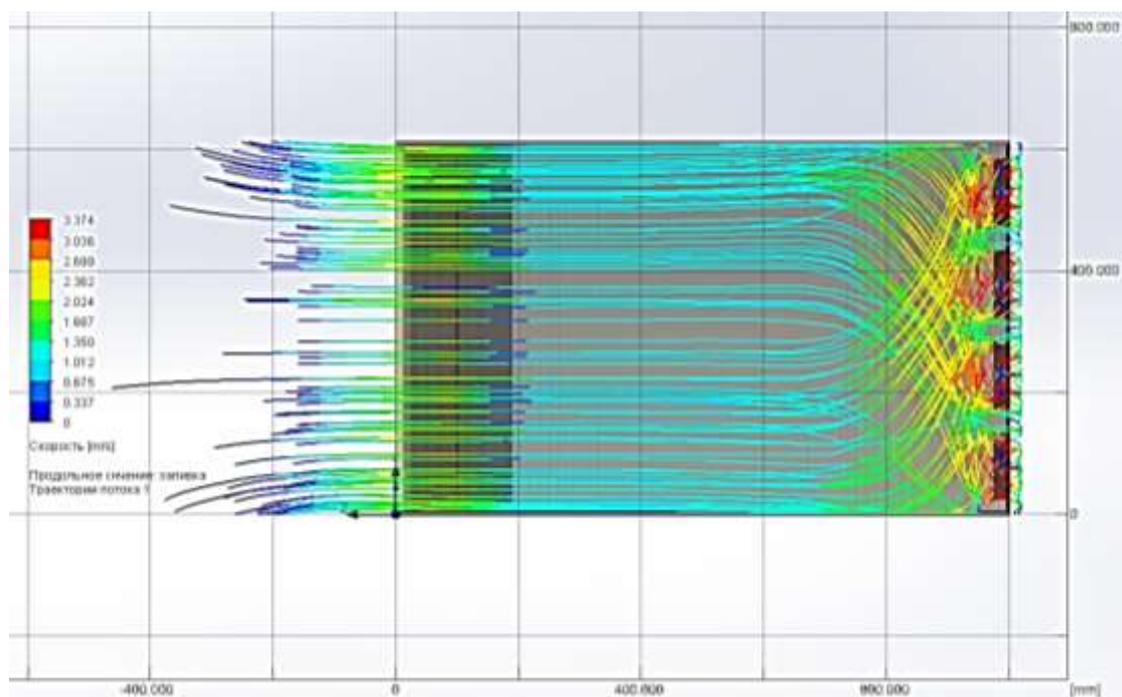


Рис. 4. Распределение потока воздуха в коробе
Fig. 4. Air flow distribution in the duct

¹²Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика: учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1970. 423 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая авторами установка позволит моделировать:

- величину реальной среднестатистической ветровой нагрузки различной интенсивности;
- пульсационную составляющую ветровой нагрузки;

- вихревое возбуждение;
- повышение доступной возможности аэродинамических исследований для реальной крановой конструкции.

Разработанная установка представляет собой устройство для тарировки внешних воздействий от силы ветра на конструкцию крана.

Список литературы

1. Sekus D., Gnatowska R., Kwiatkoń P. Impact of wind on the movement of the load carried by rotary crane // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Issue 18. P. 21–22. <https://doi.org/10.3390/app9183842>
2. Синельщиков А.В., Джалмухамбетов А.И. Развитие методов расчета устойчивости башенных кранов // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2017. Т. 12. Вып. 12. С. 1342–1351. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.12.1342-1351>
3. Тарасова Т.В. Исследование устойчивости башенных кранов при воздействии ветровых нагрузок // *Современные научные исследования и инновации*. 2016. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/06/68604> (07.06.2020).
4. Jeng Shyr-Long, Yang Chia-Feng, Chieng Wei-Hua. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2010. Vol. 38. Issue 2. P. 145–170. <https://doi.org/10.1080/15397730903482702>
5. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Stability assessment as a criterion of stabilization of the movement trajectory of mobile crane working elements // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2018. Vol. 23. No. 1. P. 65–77. <https://doi.org/10.1515/ijame-2018-0004>
6. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Crane stability assessment method in the operating cycle // *Transport Problems*. 2017. Vol. 12. Issue 4. P. 141–151. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.4.14>
7. Тюрин Ю.Н., Васильев Д.Е., Чугаев В.Д., Мяскин С.Л. Причины возникновения аварий при эксплуатации подъемных сооружений // *Химическая техника*. 2015. № 11. [Электронный ресурс]. URL: <https://chemtech.ru/prichiny-vozniknovenij-avarij-pri-jekspluatacii-podemnyh-sooruzhenij/> (15.06.2020).
8. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. 2-е изд. М.: Изд-во «ДМК Пресс», 2010. 464 с.
9. Жамалов Р.П., Королев Е.В., Котин А.И. Аэродинамические трубы как инструмент исследования. С. 54–62. // [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aerodinamicheskie-truby-kak-instrument-issledovaniya/viewer> (15.06.2020).
10. Хоробрых М.А., Фролов В.А. Проектирование экспериментальной установки для весового эксперимента в аэродинамической трубе // *Молодой ученый*. 2013. № 3. С. 116–122. [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/archive/50/6363/> (14.06.2020).
11. Бубенчиков А.А., Нифонтова Л.С., Чавриков И.Е. Установки для аэродинамического эксперимента // *Молодой ученый*. 2016. № 22. С. 11–14. [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/archive/126/35125/> (14.06.2020).
12. Clark R., Cox D., Curtiss Jr H.C., Edwards J.W., Hall K.C., Peters D.A, et al. A modern course in aeroelasticity // *Solid mechanics and its applications/ eds. E.H. Dowell*. 2005. Vol. 116. 781 p. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2106-2>
13. Волощенко О.В., Зосимов С.А., Николаев А.А., Острась В.Н., Серманов В.Н., Чевагин А.Ф. Аэродинамические экспериментальные стенды для испытаний ВРД // *Ученые записки Центрального аэрогидродинамического института*. 2012. Т. XLIII. No. 2. С. 43–54.
14. Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П., Родченко В.В. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. М.: Изд-во МАИ, 2014. 283 с.
15. Боровой В.Я., Бражко В.Н., Егоров И.В., Зайцев Е.Г., Скуратов А.С. Диагностика и численное моделирование течения в гиперзвуковых аэродинамических трубах импульсного действия // *Ученые записки Центрального аэрогидродинамического института*. 2013. Т. XLIV. No. 5. С. 28–38.
16. Мамаев К.М. Математическое моделирование нагрузок автокрана и возможность расширения его характеристик грузоподъемности // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2011. No. 23. Вып. 4. С. 76–80.
17. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V., Belyakov V.E. Study of the crawler crane stability affected by the length of compensating ropes and platform rotation angle in the mode of movement with payload // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1546. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012135>
18. Зырянова С.А. Методика автоматизированного построения математической модели стрелового грузоподъемного крана // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2014. Вып. 2. С. 77–81.
19. Жамалов Р.П., Королев Е.В., Котин А.И. Аэродинамические трубы как инструмент исследования // *Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института*. 2012. № 12. С. 54–62.
20. Прокопенко Е.А., Савищенко Н.П., Шевченко А.В., Поняев С.А., Твердохлебов К.В., Яшков С.А. Особен-



ности проведения экспериментальных исследований на сверхзвуковой атмосферно-вакуумной аэродинамической трубе // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12. Ч. 1. С. 31–36. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.005>

21. Cekus D., Gnatowska R., Kwiatoń P., Šofer M. Simulation research of a wind turbine using SolidWorks soft-

ware // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1398. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1398/1/012001>
22. Острась В.Н., Пензин В.И. Экспериментальное исследование силы трения в канале при наличии псевдоскачка // Ученые записки Центрального аэрогидродинамического института. 1974. Т. V. № 2. С. 151–155.

References

1. Cekus D, Gnatowska R, Kwiatoń P. Impact of wind on the movement of the load carried by rotary crane. *Applied Sciences*. 2019;9(18):21–22.

<https://doi.org/10.3390/app9183842>

2. Sinel'shchikov AV, Dzhal'mukhambetov AI. Development of methods for stability analysis of tower cranes. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta = Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2017;12(12):1342–1351. (In Russ.)

<https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.12.1342-1351>

3. Tarasova TV. Investigation of the stability of tower cranes under the influence of wind loads. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii = Modern scientific researches and innovations*. 2016;6. Available from: <http://web.snauka.ru/issues/2016/06/68604> [Accessed 7th June 2020]. (In Russ.)

4. Jeng Shyr-Long, Yang Chia-Feng, Chieng Wei-Hua. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2010;38(2):145–170. <https://doi.org/10.1080/15397730903482702>

5. Kacalak W, Budniak Z, Majewski M. Stability assessment as a criterion of stabilization of the movement trajectory of mobile crane working elements. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2018;23(1):65–77.

<https://doi.org/10.1515/ijame-2018-0004>

6. Kacalak W, Budniak Z, Majewski M. Crane stability assessment method in the operating cycle. *Transport Problems*. 2017;12(4):141–151. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.4.14>

7. Tyurin YuN, Vasil'ev DE, Chugaev VD, Masyakin SL. Causes of accidents when operating cranes. *Himicheskaya tekhnika*. 2015;11. Available from: <https://chemtech.ru/prichiny-vozniknovenij-avarij-pri-jekspluatcii-podemnyh-sooruzhenij/> [Accessed 15th June 2020]. (In Russ.)

8. Alyamovskij AA. *Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press; 2010, 464 p. (In Russ.)

9. Zhamalov RR, Korolev EV, Kotin AI. Windpipes – a research tool. P. 54–62. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/aerodinamicheskie-truby-kak-instrument-issledovaniya/viewer> [Accessed 15th June 2020]. (In Russ.)

10. Horobryh MA, Frolov VA. Designing of an experimental installation for a weight experiment in a wind tunnel. *Molodoj uchenyj = Young Scientist*. 2013;3:116–122. Available from: <https://moluch.ru/archive/50/6363/> [Accessed 14th June 2020]. (In Russ.)

11. Bubenchikov AA, Nifontova LS, Chavrikov IE. Instal-

lations for aerodynamic experiment. *Molodoj uchenyj = Young Scientist*. 2016;22:11–14. Available from: <https://moluch.ru/archive/126/35125/> [Accessed 14th June 2020]. (In Russ.)

12. Clark R, Cox D, Curtiss Jr HC, Edwards JW, Hall KC, Peters DA, et al. A modern course in aeroelasticity. In: Dowell EH (eds.). *Solid Mechanics and Its Applications*. 2005, vol. 116, 781 p.

<https://doi.org/10.1007/1-4020-2106-2>

13. Voloshchenko OV, Zosimov SA, Nikolaev AA, Ostras' VN, Sermanov VN, Chevagin AF. Aerodynamic experimental test benches for airbreathing jet engine tests. *Uchenye zapiski Central'nogo aerogidrodinamicheskogo instituta*. 2012;XLIII(2):43–54. (In Russ.)

14. Galeev AG, Zakharov YuV, Makarov VP, Rodchenko VV. *Designing test benches for experimental testing of objects of rocket and space facilities*. Moscow: Moscow Aviation Institute; 2014, 283 p. (In Russ.)

15. Borovoj VYa, Brazhko VN, Egorov IV, Zajcev EG, Skuratov AS. Diagnostics and numerical simulation of impulse action flow in hypersonic wind tunnels. *Uchenye zapiski Central'nogo aerogidrodinamicheskogo instituta*. 2013;XLIV(5):28–38. (In Russ.)

16. Mamaev KM. Mathematical modeling of the load of the crane and the possibility of extending his load characteristics. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2011;23(4):76–80. (In Russ.)

17. Korytov MS, Shcherbakov VS, Titenko VV, Belyakov VE. Study of the crawler crane stability affected by the length of compensating ropes and platform rotation angle in the mode of movement with payload. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1546. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012135>

18. Zyryanova SA. Methodology of the automated creation of mathematical model of the boom load-lifting crane. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2014;2:77–81. (In Russ.)

19. Zhamalov RR, Korolev EV, Kotin AI. Windpipes – a research tool. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-ekonomicheskogo instituta = Bulletin NGIEI*. 2012;12:54–62. (In Russ.)

20. Prokopenko EA, Savischenko NP, Shevchenko AV, Ponyaev SA, Tverdokhlebov KV, Yashkov SA. Features of experimental research on supersonic atmospheric vacuum driven tunnel. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*. 2018;12(1):31–36.

<https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.005>

21. Cekus D, Gnatowska R, Kwiaton P, Šofer M. Simulation research of a wind turbine using SolidWorks software. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1398. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1398/1/012001>

22. Ostras' VN, Penzun VI. Experimental study of friction force in a channel under pseudoshock. *Uchenye zapiski Central'nogo aerogidrodinamicheskogo instituta*. 1974;V(2):151–155. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сладкова Любовь Александровна,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры наземных
транспортно-технологических средств,
Российский университет транспорта,
127055, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия;
✉ e-mail: rich.cat2012@yandex.ru

Lyubov A. Sladkova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Ground Transportation
and Technological Means,
Russian University of Transport,
9 bld 9, Obrazcova St., Moscow 127055, Russia;
✉ e-mail: rich.cat2012@yandex.ru

Крылов Вадим Викторович,
заведующий лабораториями,
кафедра наземных транспортно-технологических
средств,
Российский университет транспорта,
127055, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия;
e-mail: vadimkrylov96@yandex.ru

Vadim V. Krylov,
Head of the Laboratories,
Department of Ground Transportation and Technological
Means,
Russian University of Transport,
9 bld 9, Obrazcova St., Moscow 127055, Russia;
e-mail: vadimkrylov96@yandex.ru

Кузнецов Филипп Александрович,
аспирант,
Российский университет транспорта,
127055, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия;
e-mail: odevmaltkun@gmail.com

Filipp A. Kuznetsov,
Postgraduate Student,
Russian University of Transport,
9 bld 9, Obrazcova St., Moscow 127055, Russia;
e-mail: odevmaltkun@gmail.com

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 conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 19.09.20; одобрена после рецензирования 23.10.2020; принята к публикации 20.12.2020.

Information about the article

The article was submitted on 19.09.20; approved after reviewing on 23.10.2020; accepted for publication on 20.12.2020.



Особенности определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса в исследованиях надежности топливо- и энергоснабжения

© Н.М. Береснева, Н.М. Пяткова

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

Резюме: Цель – определение критически важных для топливно-энергетического комплекса отраслевых объектов в условиях совместного функционирования отраслей, с учетом влияния системного эффекта и существующих механизмов структурной избыточности. Для определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса на базе моделей его функционирования в рамках поэтапных отраслевых и общеэнергетических исследований была предложена методика, построенная на методологии определения критически важных отраслевых объектов, на принципах оценки уязвимости элементов критических инфраструктур. Представленная методика отличается комплексностью и гибкостью оценки критичности отраслевых объектов, проводимой на базе сценарных вариантов функционирования топливно-энергетического комплекса. Методика дополнена формализованным представлением типовой оптимизационной общеэнергетической модели, унифицирующим взаимосвязь моделируемой в ней территориально-производственной структуры отраслевых систем, ее информационной базы с соответствующими технико-экономическими показателями и решаемых с ее помощью исследовательских задач. Оценка критичности объектов газовой отрасли приведена для 80 субъектов Российской Федерации. Приведены результаты апробации предложенной методики на примере определения критически важных объектов газовой отрасли с помощью модели функционирования топливно-энергетического комплекса с детализированной схемой Единой системы газоснабжения России. Данная апробация выявила различия в приоритетности критических объектов газовой отрасли и объектов топливно-энергетического комплекса, показала значительное влияние системного эффекта взаимосогласованного функционирования отраслей на топливо- и энергообеспечение потребителей. Полученные результаты подтверждают работоспособность методики, доказывают возможность ее использования для оценки критичности отраслевых объектов энергетики. Реализованная в методике схема исследований позволяет адекватно отразить ситуацию с топливо- и энергоснабжением потребителей при отключении критически важных отраслевых элементов.

Ключевые слова: критически важные объекты, топливно-энергетический комплекс, отраслевые системы, двухэтапная схема определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса, модель функционирования топливно-энергетического комплекса, критерий значимости элементов

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00367.

Для цитирования: Береснева Н.М., Пяткова Н.И. Особенности определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса в исследованиях надежности топливо- и энергоснабжения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1209–1222. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1209-1222>

Determination features of fuel and energy complex critically important facilities in fuel and energy supply reliability studies

Natalia M. Beresneva, Natalia M. Pyatkova

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study is to identify industrial facilities that are critically important for the fuel and energy complex in the conditions of joint functioning of industries, taking into account the system effect and existing mechanisms of structural redundancy. To identify critically important facilities of the fuel and energy complex based on its operation models derived as a result of stage-by-stage sectoral and general energy studies, a methodology is proposed. It is based on the identification methods of critically important industry facilities on the principles of assessing vulnerability of critically important infrastructure elements. The presented methodology is characterized by the complex and flexible assessment of the critical importance of sectoral facilities, which is carried out on the basis of scenario options of fuel and ener-

gy complex operation. The methodology is supplemented with a formalized representation of a typical general energy optimization model, which unifies the relationship between the territorial-production structure of the sectoral systems modeled in it, its information base with the corresponding technical and economic indicators, and the research problems solved with its help. The assessment of the critical importance of gas industry facilities is given for 80 constituent entities of the Russian Federation. The approbation results of the proposed methodology are given on the example of the identification of the critically important gas industry facilities using a model of fuel and energy complex operation with a detailed scheme of the Unified Gas Supply System of Russia. The approbation has revealed the differences in the priority of critically important facilities of the gas industry and the fuel and energy complex. It has also shown a significant influence of the system effect of the mutually coordinated functioning of industries on the fuel and energy supply of consumers. The results obtained confirm the efficiency of the methodology, prove the possibility of its use for assessing the critical importance of power industry branch facilities. The research scheme implemented in the methodology allows to obtain an adequate state of matters with the fuel and energy supply to consumers under cut-out critically important sectoral facilities.

Keywords: critically important facilities, fuel and energy complex, sectoral systems, two-stage scheme for the identification of critically important facilities of the fuel and energy complex, fuel and energy complex operation model, criterion of element significance

Acknowledgements: This work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 20-08-00367.

For citation: Beresneva NM, Pyatkova NM. Determination features of fuel and energy complex critically important facilities in fuel and energy supply reliability studies. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1209–1222. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1209-1222>

ВВЕДЕНИЕ

Задача определения критически важных объектов (КВО) топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является развитием задачи определения отраслевых критических элементов, обосновывается необходимостью оценки степени критичности этих элементов в условиях совместного функционирования систем энергетики (СЭ) с учетом существующих в данном случае механизмов структурной избыточности. Решение этой задачи базируется на совместном применении модельного и инструментального аппарата исследований, отражающего технологическую и территориальную структуру объектов исследования (отраслевых систем и ТЭК). Важнейшим результатом этих исследований является разработка модификаций моделей исследований, в том числе моделей функционирования ТЭК с детализированным представлением анализируемых отраслевых систем. В основу методологических решений по реализации задачи легли:

- идеи оценки уязвимости элементов критических инфраструктур [1–10], к которым, безусловно, относятся ТЭК и его отраслевые системы [11];

- методика выявления критических элементов газовой отрасли [12–15];

- формализованная ранее схема поэтапных двухуровневых модельных исследований (рис. 1), учитывающая согласованность отраслевых элементов в разноуровневых моделях [16–19].

Подобная согласованность элементов

- позволила утверждать, что значимость одного и того же критического элемента для отрасли и для ТЭК в целом может быть различной, так как при определении КВО ТЭК учитывается системный эффект от взаимодействия СЭ;

- дала возможность использовать перечень отраслевых критических элементов в качестве потенциальных КВО ТЭК при задании расчетных условий в модельных исследованиях ТЭК;

- привела к получению перечня КВО ТЭК, не соответствующего перечню отраслевых критических элементов, включающего действительно критические в условиях взаимосогласованной работы отраслей объекты.

Главным отличием разработанной методики по определению КВО ТЭК стал учет его системно-функциональной сложности, практически выраженной в наличии: множества энергоресурсов, процессов их переработки и преобразования, возможности их взаимозаменяемости на объектах электро- и тепло-

энергетики. Сравнительный анализ методик определения критических элементов на отраслевом и на общеэнергетическом уровне показал следующие результаты:

1. Обе методики ориентированы на анализ расчетных состояний, сформированных для сценариев отключений анализируемых элементов расчетных схем. Таким образом, оцениваются последствия неработоспособности данных элементов. При определении отраслевых критических элементов также предусмотрена возможность оценки последствий неработоспособности этих элементов в случае введения компенсирующих мероприятий. Этот механизм [12, 13] используется для корректировки перечня отраслевых критических элементов, позволяет исключить элементы, чья неработоспособность в значительной степени может быть компенсирована подключением резервных возможностей отрасли.

2. Обе методики предполагают модельные расчеты с различным числом одновременно отключаемых элементов (в теории

множеств размер множества называется его мощностью). При определении отраслевых критических элементов расчеты анализируются отдельно по единичным или множественным отключениям элементов [12, 13]. В методике определения КВО ТЭК заложена возможность совместного анализа расчетов с отключениями групп элементов различной мощности.

3. В обеих методиках заложена идея оценки критичности элементов с позиций изменения степени обеспеченности потребителей энергоресурсами. Поэтому анализу в обоих случаях подвергаются относительные дефициты энергоресурсов по территориям либо по каждой отраслевой системе в целом. В модели ТЭК, включающей более одной отрасли, эта оценка носит комплексный характер, учитывает суммарные относительные дефициты различных энергоресурсов у различных категорий пользователей. Здесь также предусмотрена оценка важности анализируемых модельных показателей.

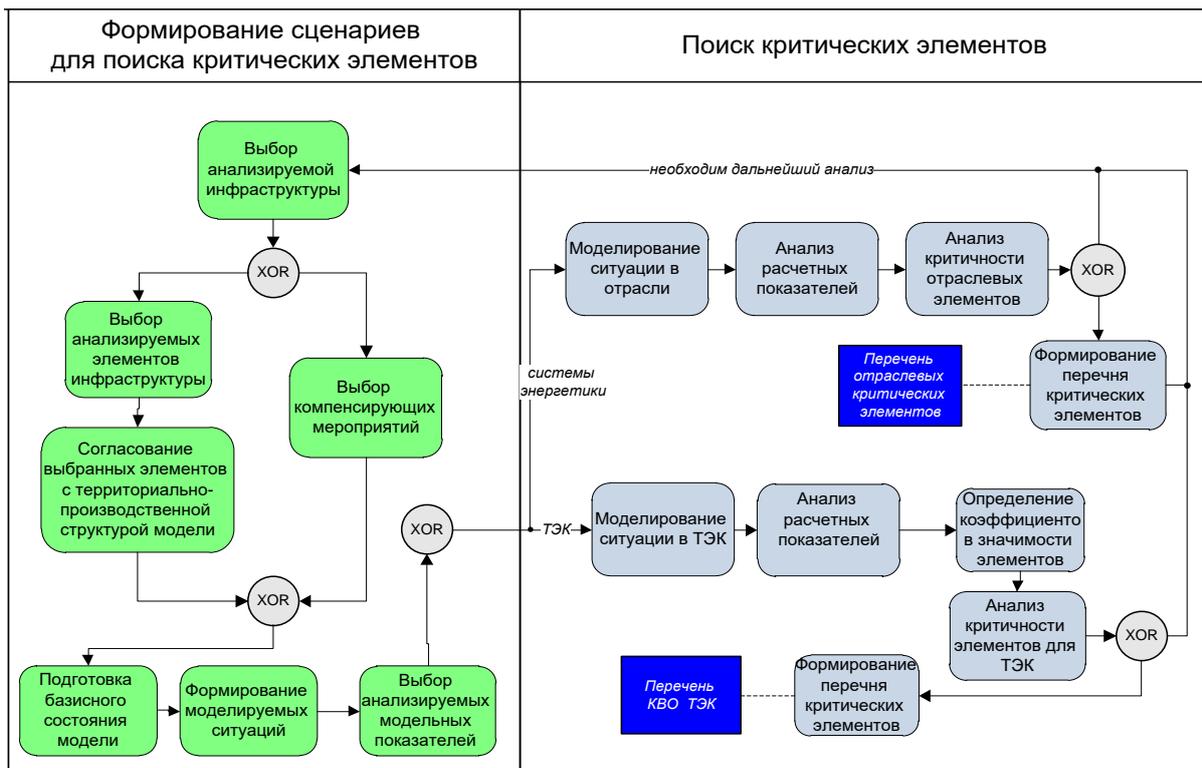


Рис. 1. Схема выбора критически важных объектов топливно-энергетического комплекса на базе отраслевых критических элементов

Fig. 1. Selection diagram of critically important facilities of the fuel and energy complex on the basis of sectoral critical elements

4. Характерное для обеих задач большое количество анализируемых расчетных состояний потребовало исключения состояний с допустимым уровнем дефицитов энергоресурсов по системе в целом. Допустимый уровень в обоих случаях устанавливается экспертным путем.

МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВО- И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Комплексные сценарные расчеты ТЭК при определении КВО ТЭК проводятся на базе территориально-производственных моделей функционирования ТЭК. Эти модели включают основные отраслевые блоки, имитирующие взаимосвязанную работу отраслевых объектов в различной степени территориальной и технологической детализации. Во временном аспекте они ориентированы на суточный разрез, так как при более значительных временных промежутках последствия сбоя работы отраслевых объектов для ТЭК в целом могут быть нивелированы.

Модели исследования представлены триплетом $M(Z, S, I)$, где $Z = \{z_t\}$, $t = \overline{1, T}$ – сценарии исследования, соответствующие гипотетическим состояниям ТЭК; S – территориально-производственная структура ТЭК и его отраслевых систем; I – информационная база модели.

Структура модели исследования представлена множеством $S(RES, REG, OBJ)$, где $RES = \{res_i\}$, $i = \overline{1, I}$ – принятые в модели энергетические ресурсы; $REG = \{reg_w\}$, $w = \overline{1, W}$ – территориальные единицы модели; $OBJ(OBJ^{tech}, OBJ^{ec})$ – объекты модели, соответствующие энергетическим OBJ^{tech} (объекты генерации электроэнергии и тепла, подземные хранилища газа и т.п.) или экономико-организационным OBJ^{ec} (компании, отраслевые организации, группы потребителей) структурам энергетики. В каждом таком объекте реализуется множество процессов $\{p_n\}$:

$$Obj_v = \{p_n\}; \quad v = \overline{1, V}; \quad n = \overline{1, N},$$

где v – индекс объекта; N – число реализуемых в объекте процессов.

Сами процессы представлены множеством $P = \{p_q\}$, $q = \overline{1, Q}$, содержательно включающим такие технологии, как:

- добыча (или производство) ресурсов;
- переработка и преобразование ресурсов;
- диверсификация ресурсов;
- хранение ресурсов;
- транспортировка ресурсов;
- потребление ресурсов.

Объекты модели привязаны к ее территориальным единицам и представляют собой часть отраслевых систем, входящих в ТЭК:

$$FEC = \{ES_f\}, \quad f = \overline{1, F};$$

$$ES_f = \{Obj_g\}, \quad g = \overline{1, G},$$

где FEC – ТЭК страны; ES_f – отраслевая система (F – число отраслей); Obj_g – множество объектов отраслевой системы f .

Информационная база модели $I(DI, DR)$ представлена исходной DI и расчетной DR информацией. Исходная информация $DI(I^{inp}, I^{rat})$ включает предметные I^{inp} (статистические, нормативно-справочные) и подготовленные для расчета (преобразованные предметные) модельные I^{rat} данные, где $I^{inp} = \{i_j^{inp}\}$, $j = \overline{1, J}$ – элементы исходной информации; $I^{rat} = \{i_k^{rat}\}$, $k = \overline{1, K}$ – элементы модели (ее переменные, коэффициенты); $F = \{F_k^j : i_j^{inp} \rightarrow i_k^{rat}\}$ – алгоритмы подготовки модельных данных на базе предметной информации.

Расчетная информация $DR = \{i_l^{opi}\}$, $l = \overline{1, L}$ (L – число переменных модели) – результат преобразования мо-



дельной информации $\{i_i^{rat}\}$ внешним решателем. Расчетная информация в процессе анализа может быть агрегирована по группам территориальных единиц.

Технически работа с моделями ТЭК представлена процессами подготовки и верификации данных, процедурами формирования, расчета и анализа различных вариантов функционирования ТЭК. При этом отправной точкой исследований является годовой сбалансированный вариант модели, на базе которого впоследствии формируются суточные варианты (вариант максимально нагруженных суток, варианты отключений объектов ТЭК). Такая цепочка работы обосновывается составом и уровнем представления статистической и аналитической отраслевой информации, относительной легкостью балансировки годовых показателей. Используемые для получения суточных вариантов корректирующие коэффициенты формируются экспертно, исходя из специфики анализируемых ситуаций, либо рассчитываются при наличии ежемесячной отраслевой отчетности.

Таким образом, реализуется схема работы с моделью ТЭК, концептуально представленная тремя этапами:

- этапом отладки сбалансированного годового варианта;
- этапом отладки варианта функционирования ТЭК в максимально нагруженные сутки;
- этапом расчета и анализа вариантов неработоспособности объектов модели в максимально нагруженные сутки.

На этапе отладки годового варианта модели выполняются массовые преобразования предметной информации с целью получения целевых характеристик функционирования объектов. Здесь производятся:

1. Отладка блока электро- и теплоэнергетики, включающая подготовку данных по станциям (или их группам) и котельным (или их группам), в том числе:

- преобразование и верификация данных по топливопотреблению на объектах отрасли (приведение к единой шкале измерения по единым для каждого из ресурсов коэффициентам);

- определение технологических характеристик функционирования тепло- и электрогенерирующих источников (объемов отпуска ими тепла и электроэнергии по отдельным видам топлива, удельных расходов топлива);

- контроль соответствия отпуска преобразованных ресурсов и расхода топлива внутри станций и котельных;

- корректировка перетоков электроэнергии;

- балансовый контроль тепла по субъектам, электроэнергии по стране в целом.

2. Отладка блока топливообеспечения, включающая:

- определение обязательных потребностей в топливе по территориям, при необходимости с разбивкой обязательной потребности по отдельным категориям (например, для нужд населения и промышленности);

- корректировку данных в случае отсутствия баланса по потреблению топлива на территориях;

- анализ пропускных способностей транспортной инфраструктуры топливных отраслей.

3. Балансовая оценка по всем энергоресурсам без учета их запасов.

4. Проведение оптимизационных расчетов, определяющих:

- «запертость» энергоресурсов, определение причин их возникновения;

- дефициты топлива на территориях, связанные с технологической недостаточностью энерготранспортной инфраструктуры, либо с дисбалансом собственных производственных возможностей и потребностей в случае изолированности территории;

- дефициты конечных видов энергоресурсов, причины их возникновения (недопоставки первичных ТЭР, технологическая недостаточность объектов транспортировки);

- уровень использования мощностей производственных объектов в отраслях ТЭК.

На этапе отладки варианта максимально нагруженных суток определяются коэффициенты сезонной неравномерности, характеризующие изменения в потреблении и в производстве энергоресурсов в текущих условиях,

резервные возможности отраслей для покрытия дополнительных потребностей в энергоресурсах. На этом этапе осуществляются:

1. В блоке электро- и теплоэнергетики:

– корректировка производственных возможностей станций и котельных в базовом режиме их функционирования;

– определение резервных возможностей оборудования на тепловых станциях и котельных;

– корректировка потребностей в электроэнергии и тепле;

– верификация стоимостных коэффициентов в части использования резервных возможностей станций, диверсификации топлива на них.

2. В блоке топливообеспечения:

– определение и подключение резервов топливных отраслей;

– корректировка обязательных потребностей в топливе.

3. Отладка варианта, в ходе которой анализируются и устраняются нестыковки в части поставок топлива потребителям, его извлечение из хранилищ, приоритетность использования топлива в электро- и теплоэнергетике.

На этапе анализа последствий от отключений критических объектов определяются относительные изменения анализируемых показателей по отдельным территориям или их группам. Эта информация используется для определения КВО ТЭК.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Методика определения критичности отраслевых энергетических объектов для территорий в условиях взаимосвязанной работы отраслевых систем отвечает следующим основным положениям:

1. Поставленная задача решается в рамках многовариантных многоуровневых вычислительных экспериментов на базе моделей функционирования ТЭК и его отраслей. Ключевая особенность данных экспериментов – многократное использование одних и тех же данных для моделей различного

уровня. Допускается использование одной и той же информации на разных уровнях в преобразованном виде.

2. Поставленная задача предполагает задание отраслевых элементов, из числа которых выбираются КВО ТЭК. Сценарии неработоспособности отраслевых элементов имитируются в проводимых вычислительных экспериментах.

3. Решение задачи предполагает трехэтапную схему преобразования результатов вычислительных экспериментов, включающую получение количественных, качественных и экспертных оценок критичности элементов. Качественные и экспертные оценки формируются на базе количественных показателей. Качественные оценки (категории критичности элементов) позволяют выделять группы отраслевых элементов, являющиеся в разной степени проблематичными для ТЭК в целом. Основополагающим является интегральный критерий значимости элементов, комплексно характеризующий изменения анализируемых модельных показателей в случае неработоспособности отраслевых элементов.

4. Анализируемые модельные показатели применительно к поставленной задаче систематизируются в две категории. Категорию важнейших показателей составляют складывающиеся на территориях дефициты энергоресурсов, являющиеся системной характеристикой функционирования отраслей. Категория сопутствующих показателей представлена технологиями обеспечения потребностей территорий (запасы и резервы, возможности взаимозаменяемости энергоресурсов в технологических процессах). Корректный анализ критичности отраслевых элементов требует учета обоих типов показателей.

Заявленный критерий значимости каждого элемента определяется по всему множеству расчетных состояний с различными комбинациями его отключений:

$$ZO_i = \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K ZO_i^{j,k} \times ZC^j \right],$$
$$ZO_i^{j,k} = \sum_{r=1}^R ZS_r^{j,k} / R,$$



где ZO_i – значимость i -го элемента ТЭК; $ZO_i^{j,k}$ – значимость i -го элемента по j -му показателю в расчетах с группами отключений мощности k ; $ZS_r^{j,k}$ – оценки состояний по j -му показателю в расчетах с включением i -го элемента в группы отключений мощности k ; R – число оцененных по j -му показателю состояний с включением i -го элемента в группы отключений мощности k ; ZC^j – значимость (удельный вес) j -го показателя; K – максимальная мощность групп отключений в оптимизационных расчетах; J – количество анализируемых показателей; I – множество отключаемых элементов ТЭК, $i \in I$.

Формализация идентификации категории критичности элементов (наиболее критичной считается первая категория) может быть представлена следующим образом:

$$CAT_i^w = f(ZO_i^w, N);$$

$$N = \{n_l\}, l = \overline{1, L};$$

$$n_l = \{n_l^{low}, n_l^{up}\}, l = \overline{1, L};$$

$$CAT_i^w =$$

$$\begin{cases} l, \text{ если } (ZO_i^{\max} \times n_l^{low}) \leq ZO_i^w < (ZO_i^{\max} \times n_l^{up}), l = \overline{2, L}; \\ 1, \text{ если } ZO_i^w \geq (ZO_i^{\max} \times n_l^{low}), l = 1 \end{cases};$$

$$ZO_i^{\max} = \max(ZO_i^w), w = \overline{1, W},$$

где CAT_i^w – категория критичности i -го элемента для территории w ; ZO_i^w – коэффициент значимости i -го элемента для территории w ; ZO_i^{\max} – максимальное значение значимости i -го элемента по всем рассматриваемым территориям; N – множество заданных категорий критичности n_l (L – число заданных категорий критичности элементов); n_l^{low} , n_l^{up} – экспертно заданные в процентном выражении нижняя и верхняя границы категории критичности l ; I – множество отключаемых элементов ТЭК; W – число рассматриваемых территориальных единиц.

Технически задача определения КВО ТЭК (рис. 2) представлена процессами преобразования и контроля данных в ходе вычислительных экспериментов, в ходе анализа рассчитанных модельных показателей, анализа критичности отраслевых элементов. Исходная информация задачи представлена целевыми установками (максимальная мощность групп отключений, перечень анализируемых отраслевых элементов и анализируемых модельных показателей, установки качественной оценки) и базисным суточным вариантом модели, возмущенные варианты которого рассчитываются в рамках проводимых экспериментов. Результирующая информация задачи – количественная, качественная и экспертная оценки, на базе которых и формируется перечень КВО ТЭК.

Формально методика определения КВО ТЭК представлена тремя этапами:

1) формирования стратегии выбора КВО ТЭК;

2) проведения оптимизационных расчетов;

3) формирования перечня КВО ТЭК.

На первом этапе:

– определяются объекты смоделированной территориально-производственной структуры ТЭК;

– выделяются группы отключаемых отраслевых элементов для их последующего включения в моделируемые ситуации;

– формируется набор критериев оценки состояний (важнейших и сопутствующих модельных показателей), устанавливается значимость этих критериев;

– определяются категории критичности элементов и их пороговые значения.

На втором этапе проводятся оптимизационные расчеты модели ТЭК, в рамках которых рассчитываются нештатные ситуации с отключениями групп отраслевых элементов.

На третьем этапе формируются оценки критичности отключаемых отраслевых элементов с последующим формированием перечня КВО ТЭК:

– корректируется состав анализируемых расчетных состояний путем исключения состояний с допустимым для страны в целом

относительным дефицитом хотя бы по одному ресурсу (на данном этапе принят 5% барьер оценки дефицита по стране в целом);

- определяются критерии значимости элементов по рассматриваемым территориям или их группам;

- определяются категории критичности для анализируемых элементов;

- формируется перечень КВО ТЭК.

Алгоритм этапа формирования перечня КВО ТЭК представлен на рис. 3. В нем все получаемые оценки привязаны к группам территорий, к которым могут быть отнесены и группы из одного региона.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Представленная методика была дважды апробирована на моделях ТЭК на примере отключений критических объектов газовой отрасли. По результатам первой тестовой апробации была доказана работоспособность и эффективность разрабатываемой методики, а также адаптированы некоторые ее ключевые моменты [20]. Текущая апробация методики была направлена на выявление разногласий в приоритетности критических объектов газовой отрасли и объектов

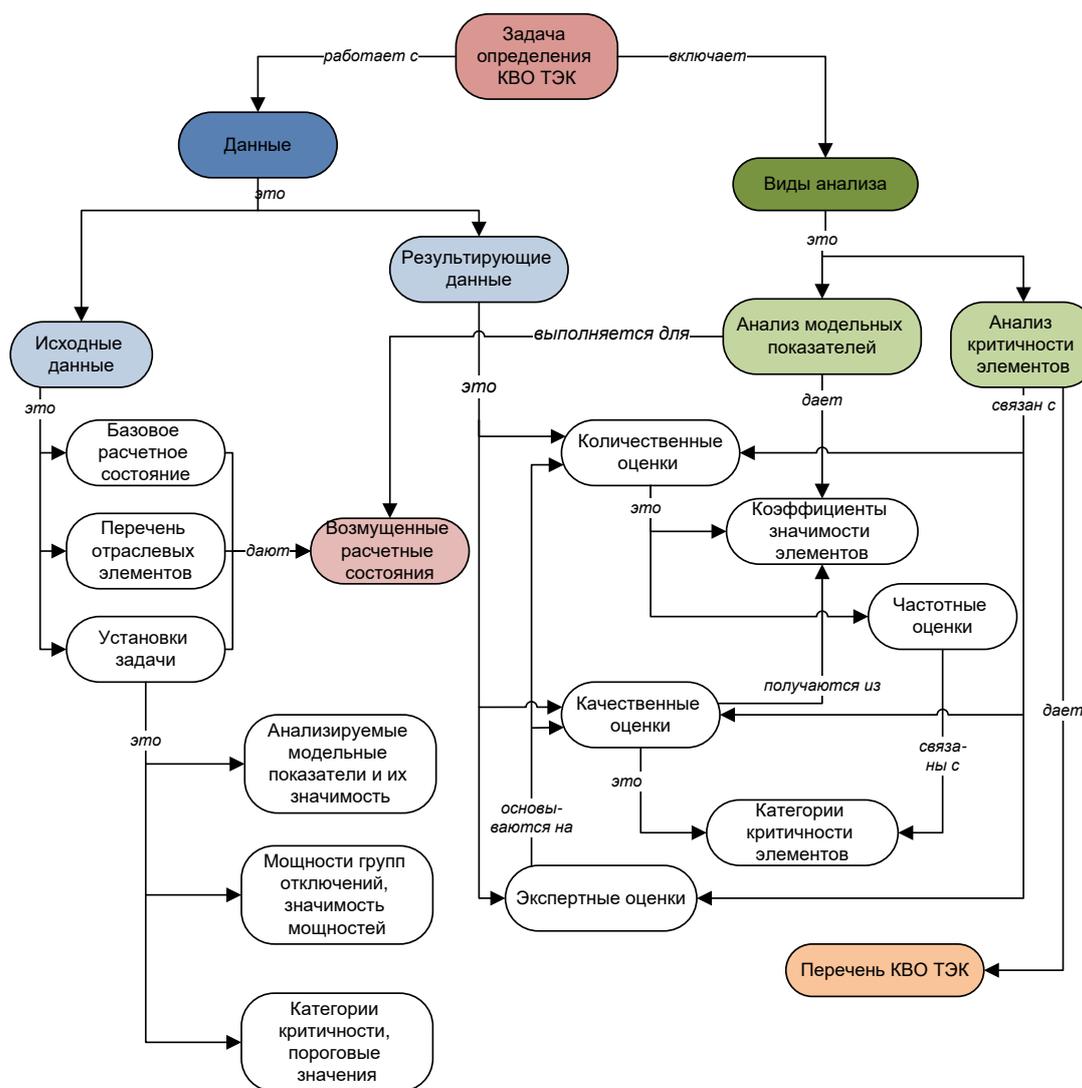


Рис. 2. Концептуальная схема решения задачи определения критически важных объектов топливно-энергетического комплекса

Fig. 2. Conceptual diagram for solving the identification problem of critically important facilities of the fuel and energy complex

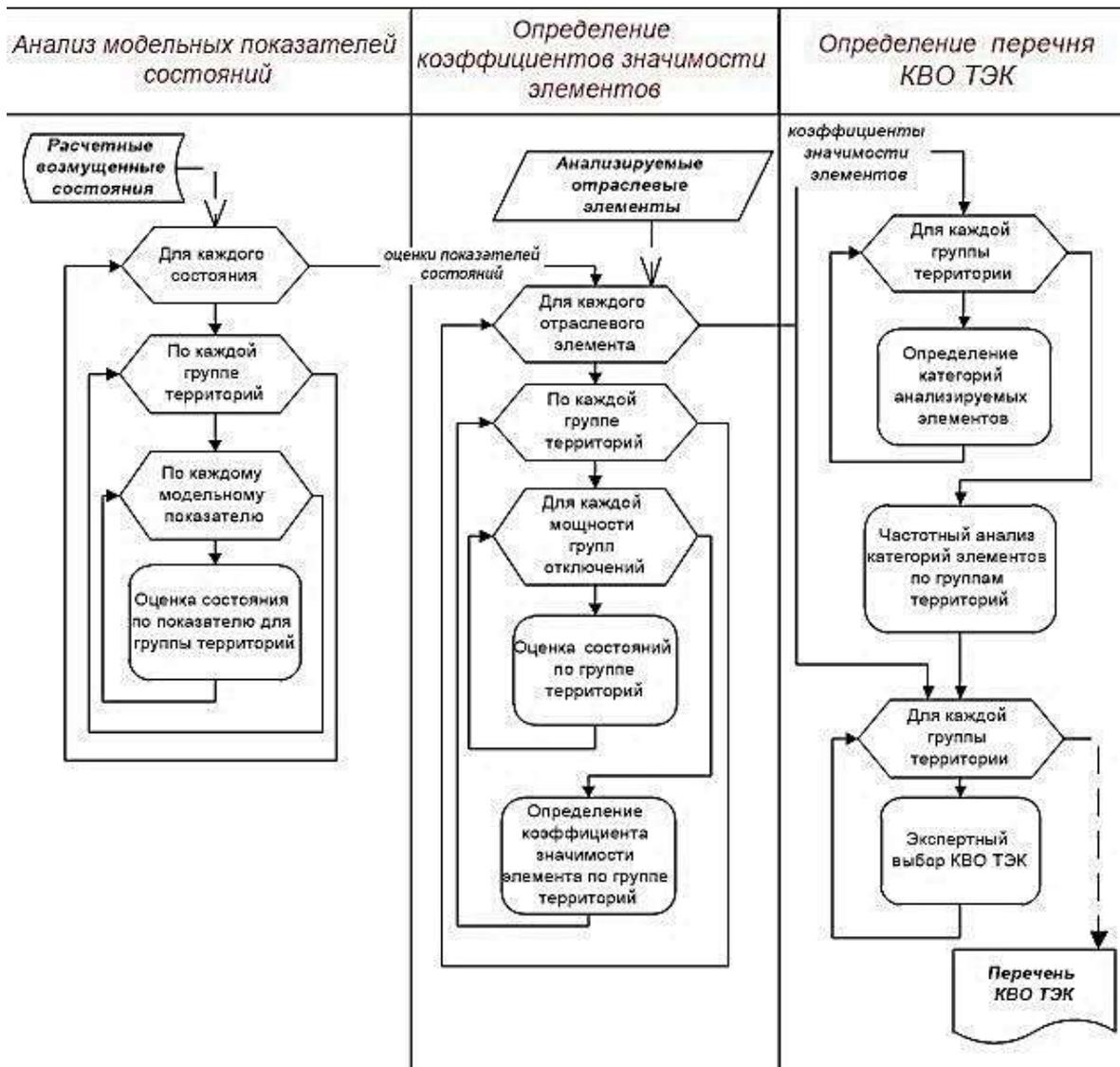


Рис. 3. Алгоритм формирования перечня критически важных объектов топливно-энергетического комплекса
Fig. 3. Formation algorithm of the list of critically important facilities of the fuel and energy complex

ТЭК на оценку правдоподобности получаемых с ее помощью результатов. Данное исследование было проведено на модели функционирования ТЭК (рис. 4) с детализированной 378 узловой расчетной схемой ЕСГ России, представленной 80 субъектами Российской Федерации. Анализировалось в исследовании влияние отключений критических объектов газовой отрасли (61 элемент) на функционирование ТЭК в целом. Результатом поочередного отключения этих объектов стало снижение производства рассматриваемых в модели энергоресурсов, появление их дефицита у потребителей. Анализ результатов исследования показал следующую картину.

Системный эффект взаимосогласованно-

го функционирования отраслей значительно снизил потенциальный дефицит энергоресурсов от недопоставки газа, изменил приоритетность критических элементов газовой отрасли для ТЭК в целом. По стране для случаев отключений данных объектов были получены дефициты, представленные на рис. 5. Дальнейший анализ критичности отключений проводился для объектов, чья неработоспособность привела к значительным дефицитам по системе в целом (суммарный дефицит более 5%). В результате в первоначальном списке из 61 объекта газовой отрасли осталось 25 элементов (рис. 6–7). Определяемый при этом показатель значимости учитывал сработку запасов, величину дивер-

сификации топлива на электростанциях, имеющих двойную топливopодачу. Эти технологические возможности позволили сни-

зить последствия недопоставки топлива из-за отключения анализируемых объектов газовой отрасли.

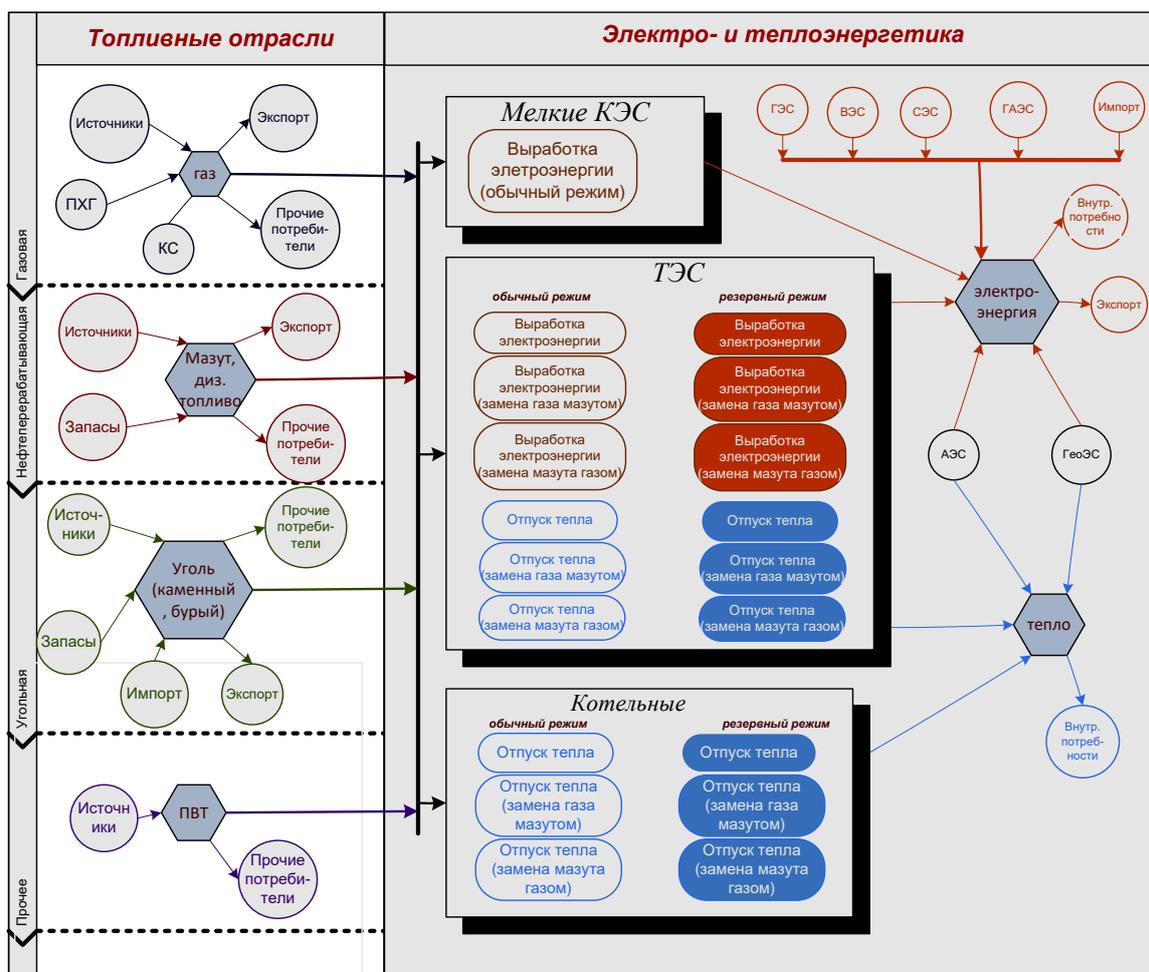


Рис. 4. Технологическая структура модели функционирования топливно-энергетического комплекса для определения критически важных для него объектов газовой отрасли
 Fig. 4. Technological structure of the model of fuel and energy complex operation to identify critically important gas industry facilities

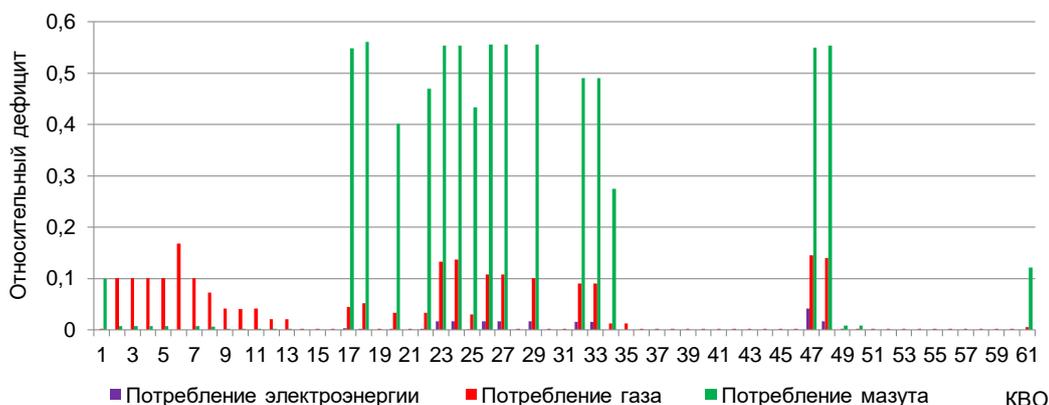


Рис. 5. Относительный дефицит энергоресурсов при отключении критических элементов газовой системы, доля ед.
 Fig. 5. Relative shortage of energy resources when critically important facilities of the gas system are cut off, proportion in units

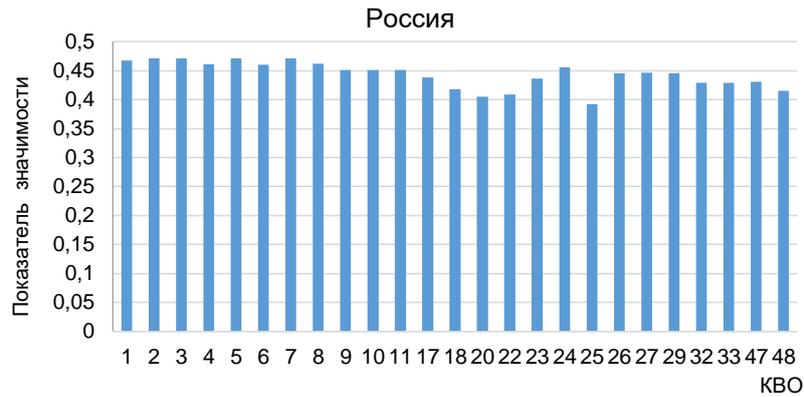


Рис. 6. Показатели значимости критических элементов газовой системы
Fig. 6. Indicators of gas system critical element importance

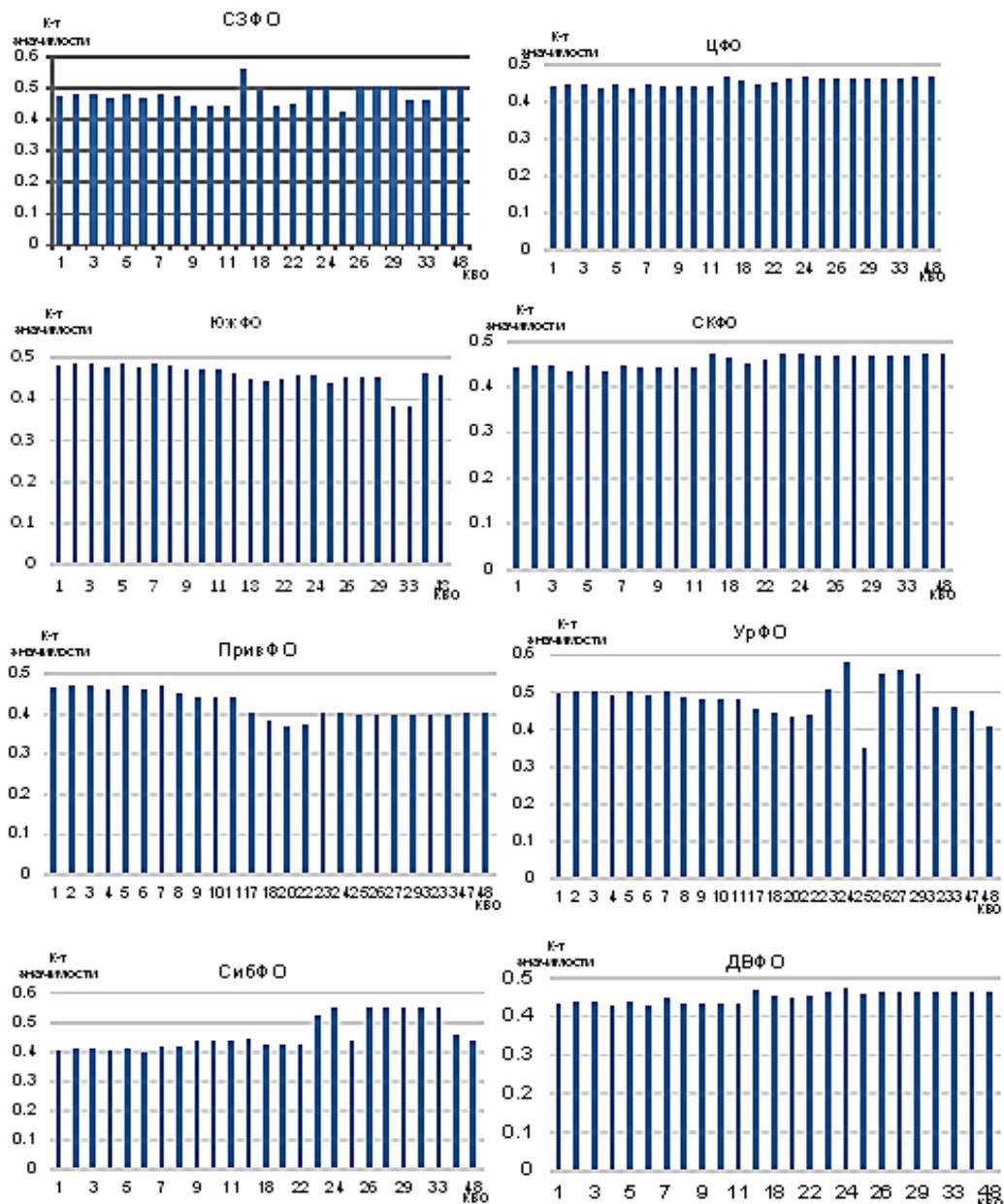


Рис. 7. Показатели значимости критических элементов газовой системы по федеральным округам
Fig. 7. Indicators of gas system critical element importance by federal districts

Классификация критических элементов газовой отрасли по влиянию на энергоснабжение потребителей
Classification of critically important elements of gas industry by their impact on energy supply of consumers

Федеральный округ	1 кат. (100–70%)	2 кат. (69–30%)	3 кат. (29–0%)
Центральный (ЦФО)	14	–	11
Северо-Западный (СЗФО)	10	3	12
Южный (ЮжФО)	12	11	2
Северо-Кавказский (СФКО)	14	–	11
Приволжский (ПривФО)	14	–	11
Уральский (УрФО)	6	14	5
Сибирский (СибФО)	7	7	11
Дальневосточный (ДВФО)	13	–	12

Ранжирование объектов по показателю значимости выявило разность приоритетности объектов в федеральных округах и по стране в целом (рис. 7). Качественный анализ был выполнен по трем категориям критичности. К первой категории были отнесены объекты, вызывающие суммарный относительный дефицит свыше 70%. Раскладка дефицитов по оставшимся категориям: от 30 до 70% для второй категории, ниже 30% для третьей. Количество критических элементов по этим группам по территории страны (по федеральным округам) распределилось следующим образом: значительный дефицит был получен на территориях, топливно-энергетический баланс которых ориентирован на использование природного газа, это Северо-Кавказский, Приволжский, Центральный и Южный округа, где количество критических элементов первой категории составило 12–14 объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена преимущество методики выбора КВО ТЭК. Разработана и формализована общая схема выбора КВО ТЭК на базе отраслевых критических элементов. Дана сравнительная характеристика отраслевой (на примере газовой отрасли) методики выбора критических элементов и методики формирования перечня КВО ТЭК с учетом системного эффекта.

В статье формализована используемая для определения КВО ТЭК территориально-производственная модель функционирования ТЭК, описана реализованная трехэтапная схема работы с ней. Представлена разработанная методика определения КВО ТЭК в условиях взаимосвязанной работы отраслевых систем. Для выбора КВО ТЭК выделены важнейшие и сопутствующие модельные показатели, предложен интегральный показатель критичности отраслевых элементов.

Список литературы

1. Su Huai, Zio Enrico, Zhang Jinjun, Li Xueyi. A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network // Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 175. P. 79–91. <http://doi.org/10.1016/j.res.2018.03.006>
2. Carvalho R., Buzna L., Bono F., Masera M., Arrowsmith D.K., Helbing D. Resilience of natural gas networks during conflicts, crises and disruptions // PLoS ONE. 2014. Vol. 9. No. 3. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090265>
3. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures // Reliability Engineering and System Safety. 2016. Vol. 152. P. 137–150. <http://doi.org/10.1016/j.res.2016.02.009>
4. Johansson J., Hassel H., Zio E. Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures: Comparing two approaches in the context of power systems // Reliability Engineering & System Safety. 2013. Vol. 120. P. 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.02.027>
5. Popescu C.-A., Simion C.P. A method for defining critical infrastructures // Energy. 2012. Vol. 42. Issue 1. P. 32–34. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.025>
6. Augutis J., Jokšas B., Krikštolaitis R., Urbonas R. The assessment technology of energy critical infrastructure // Applied Energy. 2016. Vol. 162. P. 1494–1504. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.079>
7. Zio E., Golea L.R. Analyzing the topological, electrical and reliability characteristics of a power transmission system for identifying its critical elements // Reliability Engineering & System Safety. 2012. Vol. 101. P. 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.11.009>
8. Lu Weiwei, Su Meirong, Fath B.D., Zhang Mingqi, Hao Yan. A systematic method of evaluation of Chinese natural gas supply security // Applied Energy. 2016. Vol. 165. P. 858–867. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.120>
9. Han F., Zio E., Kopustinskias V., Praks P. Quantifying the importance of elements of a gas transmission network from topological, reliability and controllability perspectives, considering capacity constraints // Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice. 2016.



P. 2565–2571. <https://doi.org/10.1201/9781315374987-389>
10. Senderov S.M., Smirnova E.M., Vorobev S.V. Analysis of vulnerability of fuel supply systems in gas-consuming regions due to failure of critical gas industry facilities // *Energy*. 2020. Vol. 212. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118785>
11. Pyatkova N., Beresneva N., Edelev A. Research of critical energy infrastructures taking into account energy security // *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S Web Conferences*. 2017. Vol. 25. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172501006>
12. Senderov S.M., Vorobev S.V. Approaches to the identification of critical facilities and critical combinations of facilities in the gas industry in terms of its operability // *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 203. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107046>
13. Воробьев С.В., Еделев А.В. Поиск критически важных объектов газовой отрасли с помощью метода определения критических элементов в сетях технических инфраструктур // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 68. Исследование и обеспечение надежности систем энергетики* / отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2017. С. 76–84.
14. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Еделев А.В. Особенности формирования перечня критически важных объектов газотранспортной сети России с учетом требований энергетической безопасности и возможные меры минимизации негативных последствий от чрезвычайных

ситуаций на таких объектах // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2016. № 1. С. 70–78.
15. Senderov S.M., Edelev A.V. Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in terms of energy security // *Energy*. 2019. Vol. 184. P. 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.063>
16. Воропай Н.И., Стенников В.А. Иерархическое моделирование систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, В.А. Стенников. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. 314 с.
17. Воропай Н.И. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных исследований СЭИ-ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
18. Воропай Н.И., Гуринович В.Д., Дзюбина Т.В., Добровольская Т.В., Домышев А.В., Дьяков А.Ф. [и др.]. Надежность систем энергетики: проблемы, модели и методы их решения / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2014. 284 с.
19. Пяткова Н.И., Сендеров С.М., Пяткова Е.В. Методические особенности исследования проблем энергетической безопасности на современном этапе // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2014. № 2. С. 81–87.
20. Beresneva N.M., Pyatkova N.I. The approach to determining vulnerable elements in critical energy infrastructures // *Methodological problems in reliability study of large energy systems: E3S Web Conferences*. 2019. Vol. 139. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901017>

References

1. Su Huai, Zio Enrico, Zhang Jinjun, Li Xueyi. A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018;175:79–91. <http://doi.org/10.1016/j.res.2018.03.006>
2. Carvalho R, Buzna L, Bono F, Masera M, Arrowsmith DK, Helbing D. Resilience of natural gas networks during conflicts, crises and disruptions. *PLoS ONE*. 2014;9(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090265>
3. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016;152:137–150. <http://doi.org/10.1016/j.res.2016.02.009>
4. Johansson J, Hassel H, Zio E. Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures: Comparing two approaches in the context of power systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2013;120:27–38. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.02.027>
5. Popescu C.-A., Simion C.P. A method for defining critical infrastructures. *Energy*. 2012;42(1):32–34. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.025>
6. Augutis J, Jokšas B, Krikštolaitis R, Urbonas R. The assessment technology of energy critical infrastructure. *Applied Energy*. 2016;162:1494–1504. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.079>
7. Zio E, Golea LR. Analyzing the topological, electrical and reliability characteristics of a power transmission system for identifying its critical elements. *Reliability Engineering & System Safety*. 2012;101:67–74.

<https://doi.org/10.1016/j.res.2011.11.009>
8. Lu Weiwei, Su Meirong, Fath BD, Zhang Mingqi, Hao Yan. A systematic method of evaluation of Chinese natural gas supply security. *Applied Energy*. 2016;165:858–867. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.120>
9. Han F, Zio E, Kopustinskias V, Praks P. Quantifying the importance of elements of a gas transmission network from topological, reliability and controllability perspectives, considering capacity constraints. *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*. 2016;2565–2571. <https://doi.org/10.1201/9781315374987-389>
10. Senderov SM, Smirnova EM, Vorobev SV. Analysis of vulnerability of fuel supply systems in gas-consuming regions due to failure of critical gas industry facilities. *Energy*. 2020;212. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118785>
11. Pyatkova N, Beresneva N, Edelev A. Research of critical energy infrastructures taking into account energy security. In: *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S Web Conferences*. 2017;25. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172501006>
12. Senderov SM, Vorobev SV. Approaches to the identification of critical facilities and critical combinations of facilities in the gas industry in terms of its operability. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;203. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107046>
13. Vorobiev SV, Edelev AV. Search for critically important gas industry facilities using the method of critical

element determination in the networks of engineering infrastructures. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki. Vypusk 68. Issledovanie i obespechenie nadezhnosti sistem energetiki = Methodological Issues of Large Energy System Reliability Research. Issue 68. Research and Provision of Energy System Reliability.* / ed. NI Voropaj. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 76–84. (In Russ.)

14. Senderov SM, Rabchuk VI, Edelev AV. Features of formation of the list of critical objects of the Russian gas pipeline network from the viewpoint of energy security and ways to minimize negative consequences of emergency situations at such objects. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering.* 2016;1:70–78. (In Russ.)

15. Senderov SM, Edelev AV. Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in terms of energy security. *Energy.* 2019;184:105–112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.063>

16. Voropaj NI, Stennikov VA. *Hierarchical modeling of power systems* / ed. NI Voropaj, VA Stennikov. Novosibirsk: Geo; 2020, 314 p. (In Russ.)

17. Voropaj NI. *Systems research in power engineering: a retrospective of scientific research of the Siberian Energy Institute – Melentiev Energy Systems Institute (SEI-ESI)* / ed. NI Voropaj. Novosibirsk: Nauka; 2010, 686 p. (In Russ.)

18. Voropaj NI, Gurinovich VD, Dzyubina TV, Dobrovolskaya TV, Domyshev AV, D'yakov AF, et al. *Reliability of energy systems: problems, models and their solution methods* / ed. NI Voropaj. Novosibirsk: Nauka; 2014, 284 p. (In Russ.)

19. Pyatkova NI, Senderov SM, Pyatkova EV. Methodological aspects of energy security investigation researches on the contemporary stage. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering.* 2014;2:81–87. (In Russ.)

20. Beresneva NM, Pyatkova NI. The approach to determining vulnerable elements in critical energy infrastructures. In: *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S Web Conferences.* 2019;139. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901017>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Береснева Наталья Михайловна,
кандидат технических наук,
научный сотрудник Отдела энергетической безопасности,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: beresneva@isem.irk.ru

Natalia M. Beresneva,
Cand. Sci. (Eng.),
Researcher of the Department of Energy Security,
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia;
✉ e-mail: beresneva@isem.irk.ru

Пяткова Наталья Михайловна,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Отдела энергетической безопасности,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: nata@isem.irk.ru

Natalia M. Pyatkova,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Department of Energy Security,
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia;
e-mail: nata@isem.irk.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 conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.09.20; одобрена после рецензирования 02.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 21.09.20; approved after reviewing 02.11.2020; accepted for publication 18.12.2020.



Диэлектрические потери при термической обработке дисперсных сред

© М.Ю. Бузунова

*Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского,
Иркутский район, п. Молодежный, Россия*

Резюме: Цель – изучение зависимости диэлектрических потерь механоактивированных зерновых культур (на примере пшеницы) при термической обработке от частоты внешнего электрического поля и температуры; исследование влияния размерности частиц мелкодисперсных образцов зерна на его электрофизические характеристики и диэлектрические потери. Экспериментальные образцы дисперсных систем с размерами частиц в интервале от 50 до 1000 μm подготовлены методом механоактивации. Измерения температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь проводились диэлектрическим методом в широком диапазоне частот. Исследована зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ механоактивированных образцов пшеницы с разной величиной степени дисперсности частиц в широком диапазоне температуры от 20°C до 250°C со скоростью нагрева 0,7 град/мин. Выявлено, что диапазон вариации частоты внешнего электрического поля расположен в интервале от 25 Гц до 10⁶ Гц. Измерения электрической емкости и проводимости проведены с помощью измерителя иммитанса E7-20 и специально сконструированной измерительной ячейки. Проведен расчет диэлектрических характеристик. Экспериментальные данные представлены в виде графиков и диаграмм. Установлена корреляция тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от частоты внешнего электрического поля и температуры, наиболее характерно выраженная для мелкодисперсных образцов. Показано, что высокой электрической активностью обладают самые мелкодисперсные образцы с размером частиц менее 50 мкм. Возрастание диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь наиболее заметно при частотах ниже 100 Гц. Исследование диэлектрических характеристик позволяет подобрать эффективный энергосберегающий режим сушки изучаемой культуры.

Ключевые слова: дисперсность, механоактивация, диэлькометрия, пшеница, диэлектрические потери, температура

Для цитирования: Бузунова М.Ю. Диэлектрические потери при термической обработке дисперсных сред. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1223–1231. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1223-1231>

Dielectric losses under heat treatment of dispersed media

Marina Yu. Buzunova

*Irkutsk State University of Agriculture named after A.A. Ezhevsky,
Molodeznyi Settlement, Irkutsk region, Russia*

Abstract: The purpose of the paper is to study the dependence of dielectric losses of mechanically activated grain crops on example of wheat under heat treatment on temperature and external electric field frequency as well as to examine the effect of particle size of fine grain samples on grain electrophysical characteristics and dielectric losses. Experimental samples of dispersed systems with particle sizes in the range from 50 to 1000 μm are prepared by the method of mechanical activation. The temperature dependence of the dielectric loss angle tangent is measured using the dielectric method over a wide frequency range. The dependence of the dielectric loss angle tangent $\text{tg}\delta$ of mechanically activated wheat samples with the different degrees of particle dispersion in a wide temperature range from 20°C to 250°C with a heating rate of 0.7 deg/min is studied. It is found out that the external electric field frequency varies in the range from 25 Hz to 10⁶ Hz. Electric capacitance and conductivity are measured using an E7-20 immitance meter and a specially designed measuring cell. Dielectric characteristics are calculated. Experimental data are presented in the form of graphs and diagrams. We have determined the correlation of the tangent of the dielectric loss angle $\text{tg}\delta$ with the frequency of the external electric field and temperature, which is most characteristic for fine samples. The most finely dispersed samples with a particle size of less than 50 microns are shown to have high electrical activity. Increase in the dielectric permittivity and the tangent of the dielectric loss angle is most noticeable at the frequencies below 100 Hz. The study of dielectric

characteristics allows to choose an effective energy-saving drying mode of the crop under study.

Keywords: dispersion, mechanoactivation, dielectrometry, wheat, dielectric losses, temperature

For citation: Buzunova MYu. Dielectric losses under heat treatment of dispersed media. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1223–1231. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1223-1231>

ВВЕДЕНИЕ

Главная роль сегодня в решении стратегической задачи энергообеспечения населения страны отводится решению актуальных вопросов энергосбережения, в том числе при проведении сушки и термообработки сельскохозяйственной продукции. Совершенствованию методов обработки и оптимизации процессов сушки зерна сегодня принадлежит значимая роль, так как эти процессы весьма энергозатратны. Самая важная технологическая операция заключается в обработке полученного урожая зерна, и решать ее нужно с учетом проблемы экономии энергоресурсов и подбора оптимальных условий хранения. При этом необходимо учитывать, что зерно обладает рядом уникальных физических свойств, определяющих его качество и длительность хранения¹. Все теплофизические характеристики зерна зависят от влажности, температуры и частоты внешнего электрического воздействия². Вариации влажности влекут за собой изменение физических свойств дисперсной среды, рассматриваемых в настоящей работе на примере механоактивированной пшеницы, и всех электрофизических показателей соответствующей среды: электропроводности σ , диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ [1–4].

Диэлектрические свойства зерновых культур используют для определения их влажности. В работе описаны диэлектрические свойства зерна и установлено, что диэлектрическая постоянная возрастает с увеличением содержания влаги и уменьшением частоты, а тангенс угла потерь и коэффициент потерь могут увеличиваться или уменьшаться с изменением этих двух переменных, в зависимости от диапазона каждого из них.

Разработана математическая модель для расчета диэлектрической проницаемости пшеницы, по которой можно рассчитать диэлектрические потери, в широком диапазоне частот от 5 МГц до 12 ГГц при различной степени влажности зерна от 3% до 24% на основе измерений диэлектрических свойств [5]. Значительное влияние на электрофизические свойства зерна оказывает температура, что связывается с изменениями содержания и количества воды, поглощенной зерном. Сушка зерна, помимо влияния на ферментативную деятельность, серьезно влияет на белковый состав зерновых культур, и при температуре выше 60°C начинается денатурация белка.

Диэлектрические свойства зерновых культур в зависимости от величины дисперсности частиц, частоты внешнего электрического поля и величины температурного воздействия исследованы в работах [4, 6–11]. Экспериментально установлено, что мелкодисперсные механоактивированные зерновые обладают неоднородными физическими свойствами, которые зависят от величины площади удельной поверхности частиц дисперсной среды, температуры и частоты. При несоблюдении температурно-влажностного режима зерно может «гореть», а объяснить этот факт можно возникновением в мелкодисперсной гетерогенной неравновесной среде микростимулированных токов при отсутствии внешнего напряжения [5, 6].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель настоящей работы состоит в исследовании электрофизических свойств неоднородной гетерогенной дисперсной среды на примере мелкодисперсных образцов пшени-

¹Карпов Б.А. Технология послеуборочной обработки и хранения зерна. М.: Агропромиздат, 1987. 288 с.

²Личко Н.М. Технология переработки продукции растениеводства. М.: Колос, 2008. 616 с.

цы с разной величиной фракций от 50 до 1000 μm . Эксперимент проведен в широком диапазоне изменения частоты внешнего электрического поля от 25 Гц до 10^6 Гц и температуры от 20°C до 250°C со скоростью нагрева 0,7 град/мин, в целях установления зависимости электрофизических характеристик от степени дисперсности частиц, частоты и температуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследована зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ механически активированных образцов пшеницы при варьировании величины дисперсности частиц в широком диапазоне температур и частот внешнего электрического поля. Основным методом исследования диэлектрических потерь при термической обработке зерна в настоящей работе являлся метод диэлькометрии [8–10], позволяющий провести анализ молекулярной структуры исследуемой среды посредством измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Экспериментальные образцы пшеницы подготовлены в результате процесса механической активации, в ходе которой получены дисперсные системы с размерами частиц в интервале от 50 до 1000 μm^3 .

Для измерения электрической емкости, расчета диэлектрических параметров: диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь, а также их температурной и частотной зависимости $\text{tg}\delta$ применялся диэлектрический метод [7, 8, 10]. Экспериментальные данные получены с помо-

щью измерителя иммитанса E7-20 (рис. 1) и специально сконструированной измерительной ячейки (плоского конденсатора с диаметром 21 мм и алюминиевыми электродами). Механоактивированные образцы зерна непрерывно квазистационарно нагревали в диапазоне от 20°C до 250°C со скоростью 0,7 град/мин. Температуру образцов измеряли хромель-алюмелевой термопарой. Используются электроды круглой формы диаметром 21 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость образцов рассчитана как отношение емкости конденсатора с веществом к емкости конденсатора без вещества. Диэлектрические потери рассчитаны по формуле:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \text{tg}\delta. \quad (1)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь определяли через частоту ν , электрическую емкость C и проводимость G уравнением:

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

Емкостный метод исследования электронной структуры и молекулярных взаимодействий, применяемый в данной работе, основан на изучении процесса поляризации, происходящего в полярном диэлектрике под действием внешнего поля. Основными параметрами, характеризующими диэлектрик, являются: диэлектрическая проницаемость, исследованная для зерновых культур в работах [6, 8, 11], и угол диэлектрических потерь δ , дополняющий угол φ сдвига фаз между током и напряжением до 90°. Общепринято считать,



Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения электрофизических характеристик
Fig. 1. Experimental installation for measuring electrophysical characteristics

³Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.

что под диэлектрическими потерями понимается часть электрической энергии, переходящая в тепло при переменном напряжении. Данные потери обусловлены электрической проводимостью и медленно устанавливающейся поляризацией, вызывающими нагрев исследуемых образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент по измерению электрической емкости и полной проводимости образцов пшеницы проводился в диапазоне частот от 25 до 10^6 Гц цифровым измерителем иммитанса напряжения Е7-20 с точностью измерения электроемкости 0,2 пФ и электропроводности 1 пСм. Полученные экспериментальные данные передавались для обработки в персональный компьютер с помощью аналого-цифрового преобразователя, затем проводились расчеты электрофизических параметров общеизвестными статистическими методами и представлялись в виде графиков и диаграмм. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для получения частотной и температурной зависимости электрофизических характеристик.

Эксперимент по изучению электрофизических свойств мелкодисперсных образцов дисперсной среды на примере пшеницы проводился диэлькометрическим методом [7, 8] при вариации температуры от 20°C до 250°C и в частотном диапазоне от 25 Гц до 10^6 Гц. При повышении температуры исследуемая мелкодисперсная среда механоактивированной пшеницы с пространственно-неоднородным распределением зарядов получает дополнительный запас энергии, влияющий на ее электрофизические свойства.

На рис. 2 представлена температурная зависимость тангенса диэлектрических потерь для образцов пшеницы с разной степенью измельчения на частоте 100 Гц. В низкотемпературной области ϵ' и $tg\delta$ возрастают, межмолекулярные силы ослабевают и способствуют более свободному повороту диполей в электрическом поле. Экспериментальные образцы зерна можно рассматривать как полярный диэлектрик, имеющий соответствующий максимум для ϵ' и $tg\delta$, обусловленный ростом температуры. Возрастание значения тангенса угла диэлектрических потерь с ростом температуры, наблюдаемое в

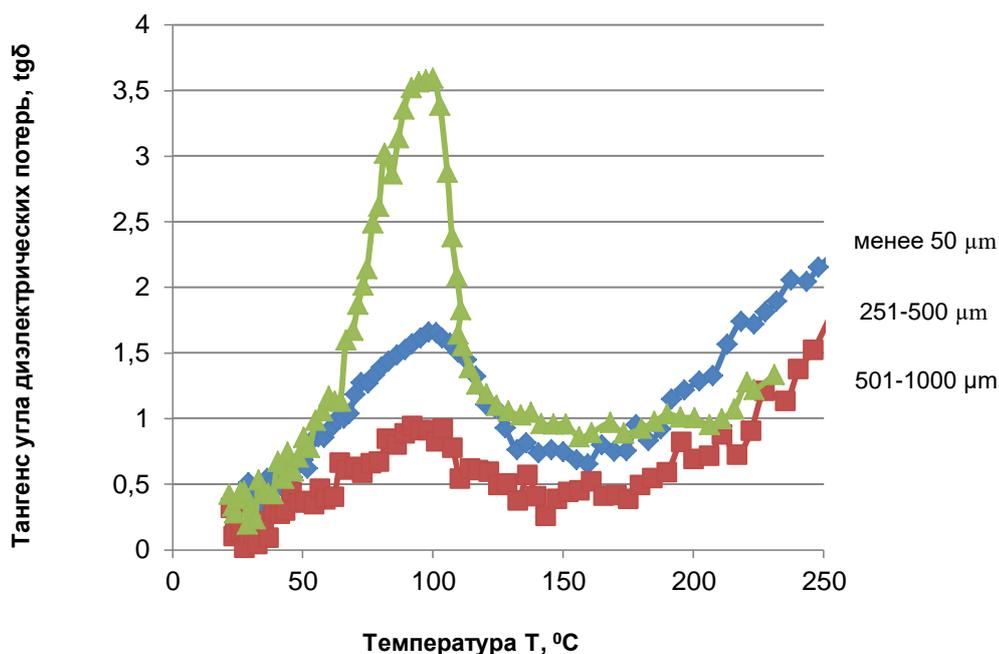


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для образцов пшеницы дисперсностью: 501–1000 мкм, 251–500 мкм и менее 50 мкм

Fig. 2. Dependence of the dielectric loss angle tangent on temperature for wheat samples with a dispersion of 501–1000 мкм, 251–500 мкм and less than 50 мкм



изучаемой гетерогенной среде, связано с процессами десорбции молекул воды из мелкозернистых зерен пшеницы в результате их сушки. При нагреве возрастает подвижность диполей, они проще ориентируются в электрическом поле, что приводит к росту ϵ' и $tg\delta$. При последующем возрастании температуры происходит рост кинетической энергии теплового движения диполей и, в результате броуновского движения, постепенное разрушение их ориентации.

В результате при приближении температуры к 100°C и диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь уменьшаются, что соответствует данным исследований, представленных в работах [6, 9].

Анализ рис. 2 показывает, что для образца 1 с максимальным размером частиц от 500 до 1000 μm максимальное значение $tg\delta = 0,94$ соответствует $T = 92^\circ\text{C}$, для образца 2 с размерностью частиц 251–500 μm $tg\delta = 1,65$ при $T = 98,2^\circ\text{C}$, а для образца 3 с наименьшей степенью дисперсности частиц $tg\delta = 3,59$ при $T = 99,0^\circ\text{C}$. В близкой к $161\text{--}168^\circ\text{C}$ области температуры наблюдается второй весьма незначительный максимум, очевидно связанный с разрушением структуры твердой компоненты. В указанном интервале температур происходит разрушение структуры исследуемых образцов и зерно постепенно «сгорает». В результате эксперимента получено, что образец с самым мелким размером частиц менее 50 μm в интервале исследуемых температур и частот от 25 до 10^6 Гц обладает большей диэлектрической проницаемостью и большими диэлектрическими потерями по сравнению с другими образцами с большим размером частиц. Данный факт также можно связать с ростом площади удельной поверхности более мелкозернистых образцов [9, 11, 12]. В области температуры от $109,6^\circ\text{C}$ до $189,9^\circ\text{C}$ различия в диэлектрических параметрах у образцов с дисперсностью частиц 251–500 μm и 50 μm сглаживаются. У наиболее крупнозернистого образца с частицами 501–1000 μm зависимость имеет преимущественно выраженный вид, что можно связать с увеличением поляризованности образцов и ослаблением сил, препятствующих ориентации доменов [6]. По-

лученные при проведении измерений спектры диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь демонстрируют типичное поведение релаксационных структур и полярных диэлектриков в электрическом поле.

На рис. 3 представлена температурная зависимость тангенса угла потерь при различных частотах для образца с дисперсностью 501–1000 μm .

Анализ результатов говорит о значимом влиянии частоты внешнего электрического поля на диэлектрические параметры образцов зерна, особенно заметном при низких частотах от 25 до 100 Гц: при частотах выше 500 Гц уменьшаются диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. Уменьшение действительной компоненты диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ при возрастании частоты внешнего электрического поля связывается с вырождением дипольно-ориентационной поляризации в исследуемых разупорядоченных системах. При увеличении частоты внешнего электрического поля длина пробега ионов за полупериод колебаний, кинетическая энергия и вероятность столкновения иона со структурными единицами материала понижаются. Поэтому при росте частоты электрического поля диэлектрические потери снижаются.

На кривых $tg\delta = f(T)$ наблюдаются также отличительные особенности, соответствующие увеличению $tg\delta$ при повышении температуры выше 170°C , особенно явно выраженные для области низких частот. Очевидно, в области высоких температур для диэлектрика сложного состава на частоте менее 100 Гц, в связи с разрушением структуры вещества и его «сгоранием», происходит резкое увеличение диэлектрических потерь. В результате анализа данных эксперимента можно сделать вывод о том, что при увеличении частоты внешнего электрического поля длина пробега ионов за полупериод колебаний, их кинетическая энергия и вероятность столкновения со структурными единицами материала уменьшаются. В связи с этим при росте частоты электрического поля диэлектрические потери понижаются.

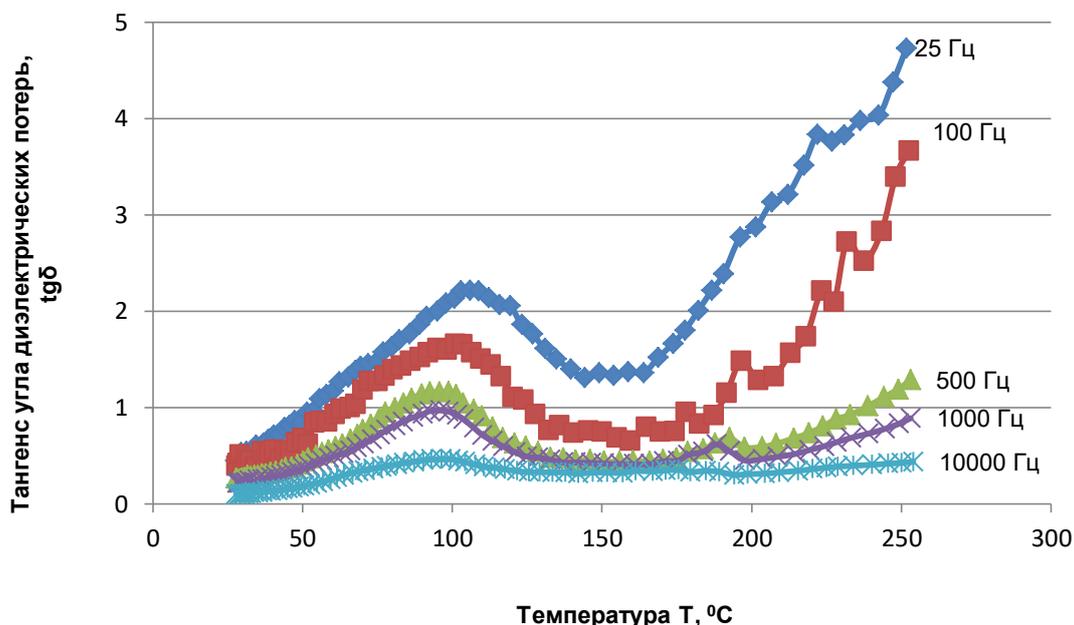


Рис. 3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для образцов пшеницы дисперсностью 501–1000 μm для различных частот: 25 Гц, 100 Гц, 500 Гц, 1000 Гц и 10000 Гц
Fig. 3. Dependence of the dielectric loss angle tangent on temperature for wheat samples with a dispersion of 501–1000 μm for various frequencies: 25 Hz, 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz and 10000 Hz

В результате эксперимента установлено, что тангенс угла диэлектрических потерь мелкозерновой механоактивированной дисперсной среды на примере зерновых культур (пшеницы) в исследуемом интервале температур от 20°C до 250°C имеет максимум при температуре близкой к 96–103°C. Анализ данных эксперимента подтверждает сложный порядок в расположении атомов исследуемой гетерогенной неравновесной мелкодисперсной среды и наличие электрических зарядов на ее дефектах, роль которых могут играть трещины и сколы зерна [12–18]. Механизм межфазного кулоновского взаимодействия на границе раздела заряженных кристаллических дефектов и молекул воды описан в работе [19]. Исследование электрофизических свойств дисперсных сред играет важную роль и в моделировании процесса сушки дисперсных материалов, в том числе зерновых [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить наличие устойчивой корреляции диэлектрических параметров неоднородной гетерогенной среды на примере мелкодис-

персных образцов пшеницы с частицами различных фракций от частоты внешнего электрического поля и температуры. В исследуемых разупорядоченных системах, в связи с вырождением дипольно-ориентационной поляризации и ростом частоты внешнего электрического поля, происходит значимое уменьшение тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$.

Анализ спектров тангенса угла диэлектрических потерь позволил установить наличие более высокой электрической активности для экспериментальных образцов мелкозерновой структуры и возрастание диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, наиболее явно выраженное при частотах ниже 100 Гц.

Установлена зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты внешнего электрического поля и температуры, особенно значимая для мелкодисперсных образцов пшеницы.

Анализ диэлектрических характеристик исследуемых образцов пшеницы позволяет подобрать эффективный энергосберегающий режим и оптимизировать процесс сушки механоактивированного зерна.



Список литературы

1. Джамбуршин А.Ш., Атыханов А.К., Сагындилова А.Ж. Интенсивный энергосберегающий метод сушки зерна // Наука и мир. 2014. Т. 1. № 10. С. 87–95. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22255165> (03.08.2020).
2. Макачук Н.О. Оценка теплового режима экструдера при грануляции отходов первичной обработки зерна // Молодежь XXI века: шаг в будущее: материалы XX Регион. науч.-практ. конф.: в 3 т. (г. Благовещенск, 23 мая 2019 г.). Благовещенск, 2019. Т. 3. С. 306–307.
3. Цымбалова В.М., Атаханов Р.В., Лаврентьев А.А. Экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости крупной продукции // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2017): матер. V Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на Дону: 2017. С. 334–337.
4. Nelson S. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. London: Academic Press, 2005. 292 p.
5. Buzunova M.Yu., Bonnet V.V. Mechanism of thermally stimulated current occurrence in fine heterogeneous medium on the example of grain crops // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 421. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052032>
6. Buzunova M.Yu., Bonnet V.V. Temperature condition influence analysis on the mechanoactivated wheat dielectric constant // Applied Physics and Cyber-Physical Systems. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022042>
7. Бузунова М.Ю. Исследование диэлектрических и структурных свойств мелкодисперсных гетерогенных систем на примере зерновых // Байкальский вестник ДААД. 2019. № 1. С. 124–129.
8. Бузунова М.Ю. Диэлектрическая дисперсия механоактивированных зерновых культур // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. Вып. 92. С. 25–32.
9. Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991. 244 с.
10. Ерошенко Г.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н., Евстафьев Д.П. Особенности разработки электротехнических устройств контроля параметров сельскохозяйственных продуктов // Измерительная техника. 2018. № 10. С. 61–65. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-10-61-65>
11. Будников Д.А., Цымбал А.А. Диэлектрические свойства сельскохозяйственных материалов // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3. С. 154–159.
12. Buzunova M.Yu., Bonnet V.V. Dielectric losses of mechanically activated grain crops during heat treatment // III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 548. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052063>
13. Цымбал А.А., Будников Д.А. Диэлектрические свойства зерновых // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016. № 4. С. 52–55.
14. Tanaev A.B., Shcherbachenko L.A., Bezrukova Y.V., Tsydypov S.B., Buzunova M.Y., Baryshnikov D.S., et al. Peculiarities of the accumulation and transport of electret charges in fine-sized disordered structures due to internal voltage // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 62. No. 3. P. 406–412. <https://doi.org/10.1134/S1063784217030239>
15. Щербаченко Л.А., Донской В.И., Шурыгина Н.А., Барышников Е.С., Ежова Л.И., Барышников Д.С. [и др.]. Структурно-фазовые переходы в дисперсных неоднородных системах при наличии электроконтактного взаимодействия разнородных компонентов // Вестник Бурятского государственного университета. 2012. № 3. С. 208–216.
16. Шурыгина Н.А., Щербаченко Л.А., Донской В.И., Карнаков В.А., Трошев А.А., Краснов Д.А. Электрические явления на межфазных границах в гетерогенных полиминеральных дисперсных системах // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2012. № 1. С. 93–100.
17. Щербаченко Л.А., Цыдыпов Ш.Б., Безрукова Я.В., Карнаков В.А., Арская Л.И., Марчук С.Д. [и др.]. Накопление свободных электретных зарядов в мелкоразмерных электрически активных системах // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 1. С. 93–97.
18. Shcherbachenko L.A., Borisov V.S., Maksimova N.T., Baryshnikov E.S., Karnakov V.A., Marchuk S.D., et al. Electret effect and electrotransport in disperse organic and inorganic systems // Technical Physics. 2009. Vol. 54. No. 9. P. 1372–1379. <https://doi.org/10.1134/S1063784209090199>
19. Пат. № 136581 U1, Российская Федерация, G01N 27/60. Устройство для диагностики электрофизических свойств гетерогенных сред / Л.И. Ружников, Н.Т. Максимова, Л.А. Щербаченко; патентообладатель Иркутский государственный университет. Заявл. 12.08.2013; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1.
20. Щербаченко Л.А., Донской В.И., Карнаков В.А., Комаров Е.В., Трошин А.А., Барышников С.С. [и др.]. Фазовые и структурные переходы в микроразмерных водных пленках в неравновесных гетерогенных системах // Вестник Бурятского государственного университета. 2012. № 3. С. 202–208.

References

1. Dzhamburshyn ASH, Atyhanov AK, Sagyndykova AZ. Intensive energy saving method of grain drying. *Nauka i Mir = Science & World*. 2014;1(10):87–95. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22255165> [Accessed 3rd August 2020]. (In Russ.)
2. Makarchuk NO. Extruder thermal regime assessment under primary grain processing waste granulation. In: *Molodezh' XXI veka: shag v budushhee: materialy XX regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 3 tomah = Youth of the XXI Century: a Step into the Future: Proceedings of XX regional scientific and practical conference: in 3 volumes*. 23 May 2019, Blagoveshhensk. Blagoveshhensk; 2019, vol. 3, p. 306–307. (In Russ.)
3. Tsymbalova VM, Atakhanov RV, Lavrentiev AA. Experimental study of cereal product dielectric permittivity. In: *Innovacionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii (ITNO-2017): materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Innovative Technologies in Science and Education (ITSE-2017): Proceedings of V International scientific and practical Conference*. Rostov-on-Don; 2017, p. 334–337. (In Russ.)
4. Nelson S. *Dielectric properties of agricultural materials and their applications*. London: Academic Press; 2005, 292 p.
5. Buzunova MY, Bonnet VV. Mechanism of thermally stimulated current occurrence in fine heterogeneous medium on the example of grain crops. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;421(5). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052032>
6. Buzunova MY, Bonnet VV. Temperature condition influence analysis on the mechanoactivated wheat dielectric constant. *Applied Physics and Cyber-Physical Systems. Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022042>
7. Buzunova MYu. Investigation of dielectric structural properties of fine heterogeneous systems on the example of grain. *Bajkal'skij vestnik DAAD = Baikal letter DAAD*. 2019;1:124–129. (In Russ.)
8. Buzunova MY. Dielectric dispersion of mechanoactivated grain crops. *Vestnik Irkutskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii = Vestnik IrGSHA*. 2019;92:25–32. (In Russ.)
9. Gorohovskij JuA, Bordovskij GA. *Thermal activation current spectroscopy of high-resistance semiconductors and dielectrics*. Moscow: Nauka; 1991, 244 p. (In Russ.)
10. Eroshenko GP, Sharuev NK, Sharuev VN, Evstafyev DP. Design features electrical devices control parameters of agricultural products. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Technology*. 2018;10:61–65. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-10-61-65> (In Russ.)
11. Budnikov DA, Tsymbal AA. Dielectric properties of agricultural materials. *Innovacii v sel'skom hozjajstve*. 2016;3(18):154–159. (In Russ.)
12. Buzunova MYu, Bonnet VV. Dielectric losses of mechanically activated grain crops during heat treatment. In: *III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;548. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052063>
13. Tsymbal AA, Budnikov DA. The grain dielectric properties. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mehanizacii zhivotnovodstva = Journal of VNIIMZH*. 2016;4:52–55. (In Russ.)
14. Tanaev AB, Shcherbachenko LA, Bezrukova YV, Tsydygov SB, Buzunova MY, Baryshnikov DS, et al. Peculiarities of the accumulation and transport of electret charges in fine-sized disordered structures due to internal voltage. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2017;62(3):406–412. <https://doi.org/10.1134/S1063784217030239>
15. Shcherbachenko LA, Donskoy VI, Shurigina NA, Barishnikov ES, Ezhova LI, Barishnikov DS, et al. Structural and phase transitions in dispersed heterogeneous systems in the presence of electric-interaction of heterogeneous components. *Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012;3:208–216. (In Russ.)
16. Shourygina NA, Scherbachenko LA, Donskoy VI, Karnakov VA, Troshchikov AA, Krasnov DA. Electrical phenomena at interfaces in heterogeneous poly mineral systems dispersed. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki = St. Petersburg Polytechnic University Journal – Physics and Mathematics*. 2012;1:93–100. (In Russ.)
17. Shcherbachenko LA, Tsydygov SB, Bezrukova YV, Karnakov VA, Arskaya LI, Marchuk SD, et al. Accumulation of free electret charges in small-sized electrically active systems. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika = Russian Physics Journal*. 2017;60–1:93–97. (In Russ.)
18. Shcherbachenko LA, Borisov VS, Maksimova NT, Baryshnikov ES, Karnakov VA, Marchuk SD, et al. Electret effect and electrotransport in disperse organic and inorganic systems. *Technical Physics*. 2009;54(9):1372–1379. <https://doi.org/10.1134/S1063784209090199>
19. Ruzhnikov LI, Maksimova NT, Shcherbachenko LA. *Diagnostic device for electrophysical properties of heterogeneous media*. Patent RF, no 136581 U1; 2014. (In Russ.)
20. Shcherbachenko LA, Donskoy VI, Karnakov VA, Komarov EV, Troshin AA, Baryshnikov SS, et al. Phase and structural transitions in microsized water films in disbalanced heterogeneous systems. *Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012;3:202–208. (In Russ.)



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Бузунова Марина Юрьевна,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования и физики,
Иркутский государственный аграрный университет
им. А.А. Ежевского,
664038, Иркутская область, Иркутский р-н,
п. Молодежный, 1/1, Россия;
✉ e-mail: bmirk@mail.ru

Заявленный вклад автора

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.10.20; одобрена после рецензирования 19.11.2020; принята к публикации 16.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Marina Yu. Buzunova,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Electrical Equipment and Physics,
Irkutsk State Agrarian University named
after A.A. Ezhevsky,
1/1, Molodezhny settlement, Irkutsk region, Irkutsk district,
664038, Russia;
✉ e-mail: bmirk@mail.ru

Contribution of the author

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

Conflict of interests

The author declares no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 06.10.20; approved after reviewing 19.11.2020; accepted for publication 16.12.2020.



Исследование влияния диаметра выходных отверстий на эффективность разделения эмульсии в прямоугольных сепараторах

© И.Н. Мадышев*, В.Э. Зинуров**, А.В. Дмитриев**,
Данг Суан Винь**, Г.Р. Бадретдинова**

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

**Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: Цель – экспериментальные исследования разделения водонефтяных эмульсий в прямоугольном сепараторе в диапазоне скоростей движения по рабочей зоне устройства от 1,43 до 2,5 м/с. Для определения эффективности разделения эмульсии был использован экспериментальный метод, основанный на измерении плотности двухфазной жидкости при условии, что плотность каждого компонента смеси была предварительно определена. Авторами работы предлагается использовать устройство с П-образными элементами для повышения его производительности при разделении водонефтяных эмульсий. Исследуемое устройство состоит из одной полной ступени разделения, представляющей собой два ряда П-образных элементов. Авторами были проведены экспериментальные исследования устройства с П-образными элементами на системе «масло – вода». В ходе экспериментальных исследований оценивалась эффективность разделения эмульсии. Установлено, что наиболее высокая эффективность разделения эмульсии в предлагаемых устройствах наблюдается при диаметре отверстий равных 2,5 мм, предназначенных для выхода тяжелой фазы в диапазоне скоростей движения эмульсии от 1,43 до 2,5 м/с, и составляет 68%. Проведенные экспериментальные исследования позволят подобрать модель турбулентности для расчета в таких программах как Ansys Fluent или FlowVision, которая будет наиболее адекватно описывать процесс разделения подобных эмульсий. Эксперименты доказали возможность получения высоких значений эффективности. Следовательно, правильный подбор технологических параметров (среднерасходной скорости, концентрации) и размеров характерных элементов предлагаемого устройства позволит определиться с конструкцией прямоугольного сепаратора, например, рассчитать количество ступеней для достижения требуемой эффективности разделения или определить размер сепарационных элементов.

Ключевые слова: водонефтяная эмульсия, сепаратор, отстойник, нефтепродукты, сточные воды

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-616.2020.8.

Для цитирования: Мадышев И.Н., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Данг С.В., Бадретдинова Г.Р. Исследование влияния диаметра выходных отверстий на эффективность разделения эмульсии в прямоугольных сепараторах. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1232–1242. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1232-1242>

Investigation of outlet diameter effect on emulsion separation efficiency in rectangular separators

Ilnur N. Madyshev*, Vadim E. Zinurov**, Andrey V. Dmitriev**,
Dang Xuan Vinh**, Guzel R. Badretdinova**

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The purpose of the study is to conduct experimental studies of oil-water emulsion separation in a rectangular separator in the range of velocities along the device working area from 1.43 to 2.5 m/s. The efficiency of emulsion separation is determined by an experimental method based on measuring the density of a two-phase liquid, provided that the density of each component of the mixture is previously determined. The authors propose to use a device with U-shaped elements to increase its performance when separating oil-water emulsions. The device under study including two rows of U-shaped elements consists of one complete separation stage. The authors have conducted experimental studies of the device with U-shaped elements on the "oil-water" system, during which the efficiency of emulsion separation was evalu-

ated. It was determined that the proposed device provides the highest efficiency of emulsion separation of 68% when the diameter of the holes intended for the exit of the heavy phase equals to 2.5 mm in the range of emulsion velocities from 1.43 to 2.5 m/s. The conducted experimental studies will allow to use a turbulence model for calculation in the programs like Ansys Fluent or FlowVision, which will most adequately describe the separation process of similar emulsions. The experiments have proved the possibility of obtaining high values of efficiency. Therefore, the correct selection of technological parameters (average flow rate, concentration) and the size of the characteristic elements of the proposed device will allow to specify the design of a rectangular separator, for example, to calculate the number of stages to achieve the required separation efficiency or to determine the size of the separation elements.

Keywords: oil-water emulsion, separator, sump, oil products, waste water

Acknowledgements: The work was performed at the financial support of the grant of the President of the Russian Federation no. МК-616.2020.8.

For citation: Madyshev IN, Zinurov VE, Dmitriev AV, Dang Xuan Vinh, Badretdinova GR. Investigation of outlet diameter effect on emulsion separation efficiency in rectangular separators. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1232–1242. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1232-1242>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач на тепловых электрических станциях (ТЭС) является качественная очистка сточных вод от нефтепродуктов, источником которых служат мазутные хозяйства, работа электротехнического оборудования и вспомогательных служб (депо, гаражи, склады). Загрязненные сточные воды нефтепродуктами негативно влияют на окружающую среду: нарушается экосистема природных водоемов, загрязняется грунт [1–3]. Следует отметить, что на многих ТЭС мазут является резервным топливом и служит в качестве растопочного топлива. Это указывает на то, что тепловые станции, содержащие в качестве резервного топлива мазут, должны хранить достаточно большие его объемы для обеспечения энергией населенных пунктов в критическое время. В свою

очередь, хранение больших объемов мазутного и иных видов нефтяных топлив всегда несет риски, связанные с загрязнением окружающей среды. Подтверждением этому является недавно произошедшая на территории нашей страны экологическая катастрофа – утечка дизельного топлива в Норильске на ТЭЦ-3 вследствие разгерметизации бака с дизельным топливом. Отмечается, что в окружающую среду (далеко за пределы промзоны) утекло около 21 тыс. т дизельного топлива, 6 тыс. т из которых попали в грунт и 15 тыс. т попали в р. Далдыкан, которая является элементом цепочки до Карского моря. Помимо серьезной экологической катастрофы, нанесенный ущерб, оцененный Росприроднадзором, составил около 148 миллиардов рублей [4]. Следует отметить, что после произошедшей аварии на Норильской ТЭЦ-3

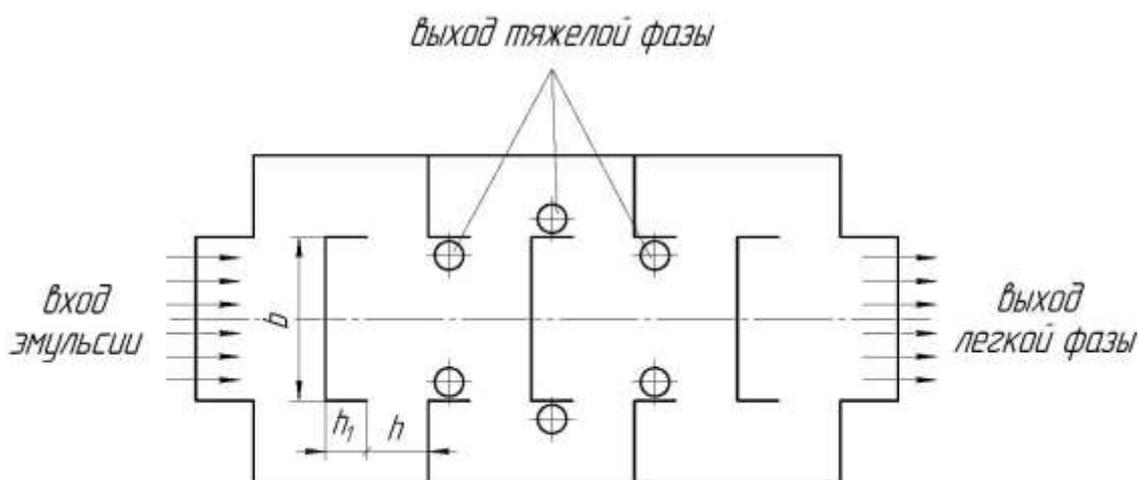


Рис. 1. Принцип работы предлагаемого аппарата для разделения водонефтяных эмульсий
Fig. 1. Operating principle of the proposed apparatus for separating oil-water emulsions



имелись проблемы с быстрой очисткой вод и их больших объемов от нефтепродуктов, так как они уносились течением реки в сторону Карского моря. Таким образом, тепловые электрические станции, использующие при производстве тепловой и электрической энергии различные виды нефтепродуктов, должны иметь в наличии оборудование для очистки сточных вод от нефтепродуктов. При этом должны соблюдаться некоторые требования для данного оборудования, в частности это простота использования оборудования, простота конструкции и, как показывает опыт, большая пропускная способность. Данные требования были сформулированы на основе того, что очистительное оборудование в случае необходимости будет применяться персоналом ТЭС, в основные обязанности которого входят другие задачи, поэтому должна обеспечиваться максимальная простота при использовании данного оборудования для удаления нефтяных компонентов из сточных вод. Также в случае нестандартных ситуаций очистительное оборудование должно обеспечивать максимально возможную пропускную способность.

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ВЫХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СЕПАРАТОРАХ

В настоящее время имеется большое количество различных аппаратов для очистки сточных вод от нефтепродуктов (разделения водонефтяных эмульсий). Они подразделяются в зависимости от принципа действия: на основе гравитационного отстаивания, химических, термических, электрических и других способов [5–9]. Наиболее простым способом является гравитационное отстаивание нефтепродуктов в отстойниках [10–12]. К недостаткам такого подхода относится необходимость в больших производственных площадях для размещения данных аппаратов. Также гравитационное отстаивание осуществляется при низкой скорости. Использование аппаратов работниками ТЭС на основе других способов, представленных выше, носит затруднительный характер, так как принцип действия данных аппаратов достаточно

сложен [13–18]. Поэтому разработка новых конструкций аппаратов для разделения водонефтяных эмульсий, удовлетворяющих таким требованиям как высокая производительность, простота использования и простота применения, являются актуальными для топливно-энергетического комплекса.

Решение задачи повышения эффективности и производительности аппаратов для разделения водонефтяных эмульсий авторы видят в использовании устройства [7], содержащего множество П-образных элементов, они в каждом последующем ряду расположены между элементами в каждом предыдущем ряду (рис. 1). При движении водонефтяной эмульсии между элементами устройства возникает центробежная сила, приводящая к образованию зон циркуляционного движения с небольшими радиусами вихрей. Как показывают проведенные ранее численные исследования гидродинамики потока эмульсии в предлагаемом устройстве [10], эти вихри образуются вблизи стенок П-образных элементов с внешней стороны. В связи с этим в данной области выполнены отверстия для вывода расслоившейся эмульсии.

На практике при расслоении эмульсии в предлагаемых устройствах с П-образными элементами действует ряд факторов, существенно влияющих на эффективность разделения [19]. Так, например, при взаимодействии набегающего потока свежей эмульсии на закрученный вихревой поток вблизи отверстий определяющим становятся их результирующее влияние на гидродинамику потока (рис. 2). В связи с тем, что направление вращения вихревой структуры совпадает с направлением движения основного потока эмульсии, в области, расположенной в осевой части П-образного элемента наблюдается повышение скоростного напора, и, как следствие, снижение пьезометрического давления. Это приводит к тому, что к центральной части аппарата перемещается преимущественно более легкая фаза, а тяжелая за счет разности давлений, вызванных аналогом эффекта Магнуса, перемещается к выходным отверстиям. Такие эффекты, определяющие эффективность работы предлага-

емого сепаратора, наблюдаются на каждой ступени. При этом использование нескольких ступеней позволяет практически полностью разделять водонефтяные эмульсии на несколько фракций [20].

С целью оценки влияния конструктивного оформления разработанного аппарата на эффективность разделения водонефтяных эмульсий проведены экспериментальные исследования устройства с П-образными элементами на системе «масло – вода». Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

Исследуемое устройство для разделения эмульсий состоит из одной полной ступени разделения, представляющее собой два ряда П-образных элементов. Ширина П-образного элемента составляла $b = 20$ мм, длина стенки $h_1 = 5$ мм, зазор между рядами $h = 7,5$ мм. В верхней крышке устройства были выполнены отверстия различного диаметра, значение которых варьировалось в диапазоне от 2,5 до 4,5 мм, при этом расстояние от оси отверстия до боковой стенки сепаратора составляло 4 мм. В исследуемом аппа-

рате на входе и выходе из устройства были предусмотрены участки стабилизации потока эмульсии длиной по 20 и 25 мм, соответственно. При этом ширина устройства составляла 40 мм, длина 75 мм и высота 15 мм. Патрубки входа эмульсии и выхода легкой фазы были выполнены в виде трубок размерами 20x2 мм. Фотография исследуемого сепаратора с различными диаметрами отверстий для выхода тяжелой фазы представлена на рис. 4.

В ходе экспериментальных исследований предлагаемого сепаратора оценивалась эффективность разделения эмульсии. В качестве эмульсии использовались вода и масло, разбавленное в пропорции 0,67:0,33 по объему. Эмульсия вручную перемешивалась в емкости 1 и через жидкостной фильтр 5, служащий для улавливания твердых включений, насосом 3 подавалась в исследуемый аппарат 2. Определение плотности исходной смеси выполнялось соответствующим замером из емкости для пробоотборника 4 (см. рис. 3).

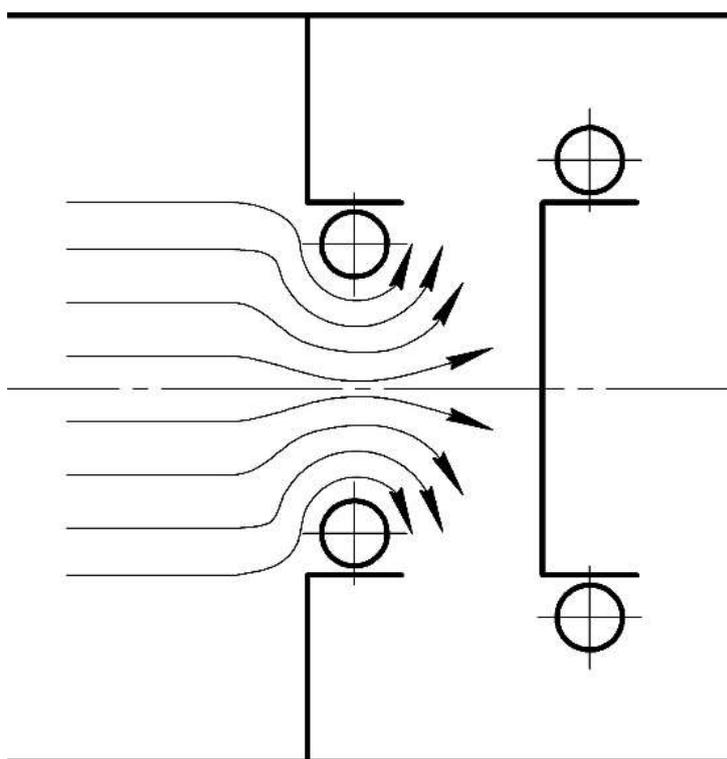


Рис. 2. Структура потока в предлагаемом устройстве с П-образным элементом для разделения эмульсий
Fig. 2. Flow structure in the proposed device with a U-shaped element for separating emulsions

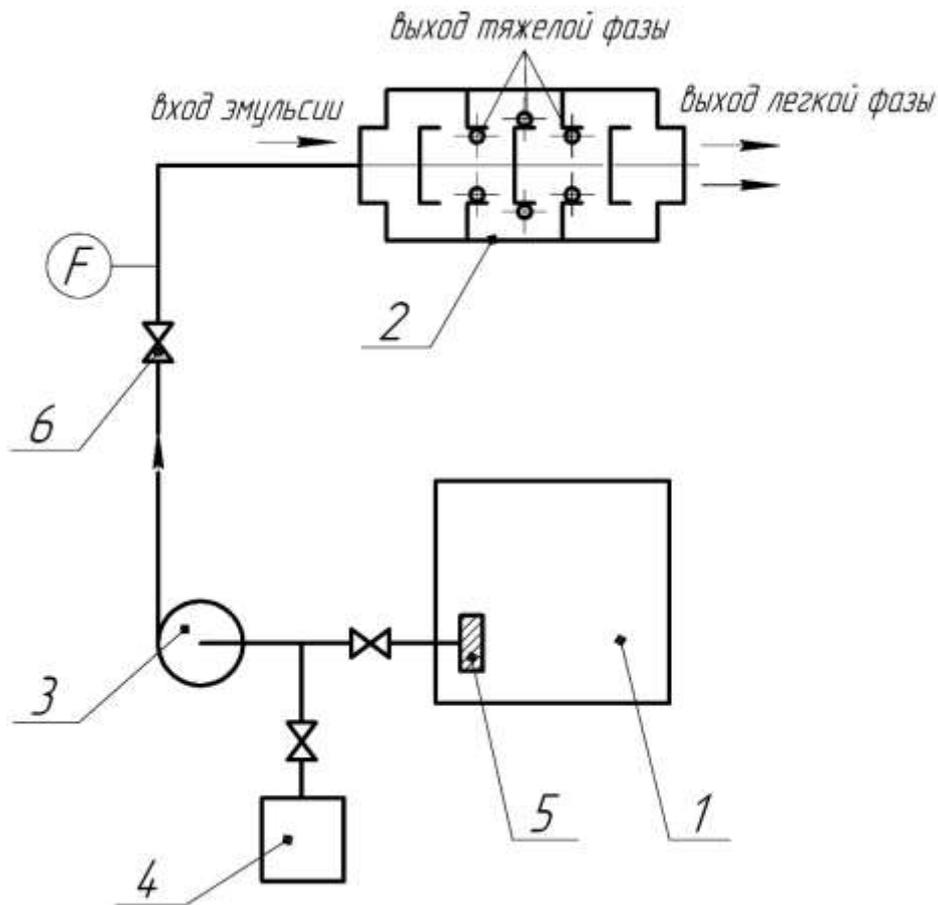


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – емкость с исходной эмульсией; 2 – устройство с П-образными элементами; 3 – насос; 4 – емкость для пробоотборника; 5 – жидкостной фильтр; 6 – запорная арматура на линии подачи эмульсии
Fig. 3. Diagram of the experimental setup: 1 – tank with the initial emulsion; 2 – device with U-shaped elements; 3 – pump; 4 – sampler tank; 5 – liquid filter; 6 – shut-off valves on the emulsion supply line



Рис. 4. Фотография устройства с П-образными элементами, предназначенного для разделения эмульсий
Fig. 4. View of a device with U-shaped elements designed for separating emulsions

Расход подаваемой эмульсии регулировался с помощью запорной арматуры 6 в виде шарового крана, а измерение производилось при помощи счетчика, имеющего относительную погрешность не более $\pm 5\%$. В хо-

де исследований определялась плотности исходной эмульсии, легкой и тяжелой фаз при помощи ареометров АНТ-1 830-890, АНТ-1 890-950 и АНТ-1 950-1010, предназначенных для измерения плотности нефтепродук-

тов в диапазоне значений от 830 до 1010 кг/м³. Массовый расход изменялся в пределах 0,15–0,73 кг/с, что соответствует действительным скоростям движения эмульсии в наиболее узком сечении сепаратора от 0,5 до 2,65 м/с. При этом соотношение массовых расходов тяжелой и легкой фаз составляло в среднем 1:10.

Результаты экспериментальных исследований устройства с П-образными элементами с диаметром отверстий равным 2,5 мм для выхода тяжелой фазы представлены в табл. 1.

Массовую долю масла в эмульсии можно определить из выражения:

$$\rho_{см} = \frac{1}{\frac{x}{\rho_{масло}} + \frac{1-x}{\rho_{вода}}},$$

где $\rho_{см}$ – плотность эмульсии, кг/м³; $\rho_{масло}$ – плотность масла, кг/м³; $\rho_{вода}$ – плотность воды, кг/м³; x – массовая доля масла в эмульсии, кг масла/кг эмульсии.

Результаты выражения массовой доли масла в эмульсии представлены в табл. 2.

Эффективность разделения эмульсии можно оценить по выражению:

$$E = \frac{\bar{x}_D - \bar{x}_F}{1 - \bar{x}_F},$$

где \bar{x}_D – массовая доля масла в легкой фазе, кг/кг; \bar{x}_F – массовая доля масла в исходной смеси, кг/кг.

Из представленного на рис. 6 графика очевидно, что наиболее высокая эффективность разделения эмульсии в предлагаемых

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований разделения водомасляной эмульсии

Table 1. Results of experimental studies of water-oil emulsion separation

№ опыта	Действительная скорость W_h , м/с	Плотность исходной эмульсии ρ_F , кг/м ³	Плотность легкой фазы ρ_D , кг/м ³	Плотность тяжелой фазы ρ_W , кг/м ³
1	1,432	943	888	950
2	1,434	936	886	957
3	1,512	944	895	950
4	1,801	944	882,5	949
5	2,035	937	897	938
6	2,146	949	898	950
7	2,216	938	892,5	953
8	2,307	945	896	950
9	2,345	957	891	958
10	2,477	949	897,5	950
11	2,497	941	892	947

Таблица 2. Массовые доли масла при различных значениях скорости движения эмульсии

Table 2. Mass fractions of oil at different values of emulsion velocity

№ опыта	Действительная скорость W_h , м/с	Массовая доля масла, кг/кг		
		в исходной эмульсии \bar{x}_F	в легкой фазе \bar{x}_D	в тяжелой фазе \bar{x}_W
1	1,432	0,396	0,84	0,34
2	1,434	0,45	0,86	0,29
3	1,512	0,39	0,79	0,34
4	1,801	0,39	0,89	0,35
5	2,035	0,45	0,765	0,44
6	2,146	0,35	0,76	0,34
7	2,216	0,43	0,8	0,32
8	2,307	0,38	0,775	0,34
9	2,345	0,336	0,82	0,29
10	2,477	0,35	0,76	0,34
11	2,497	0,41	0,81	0,366

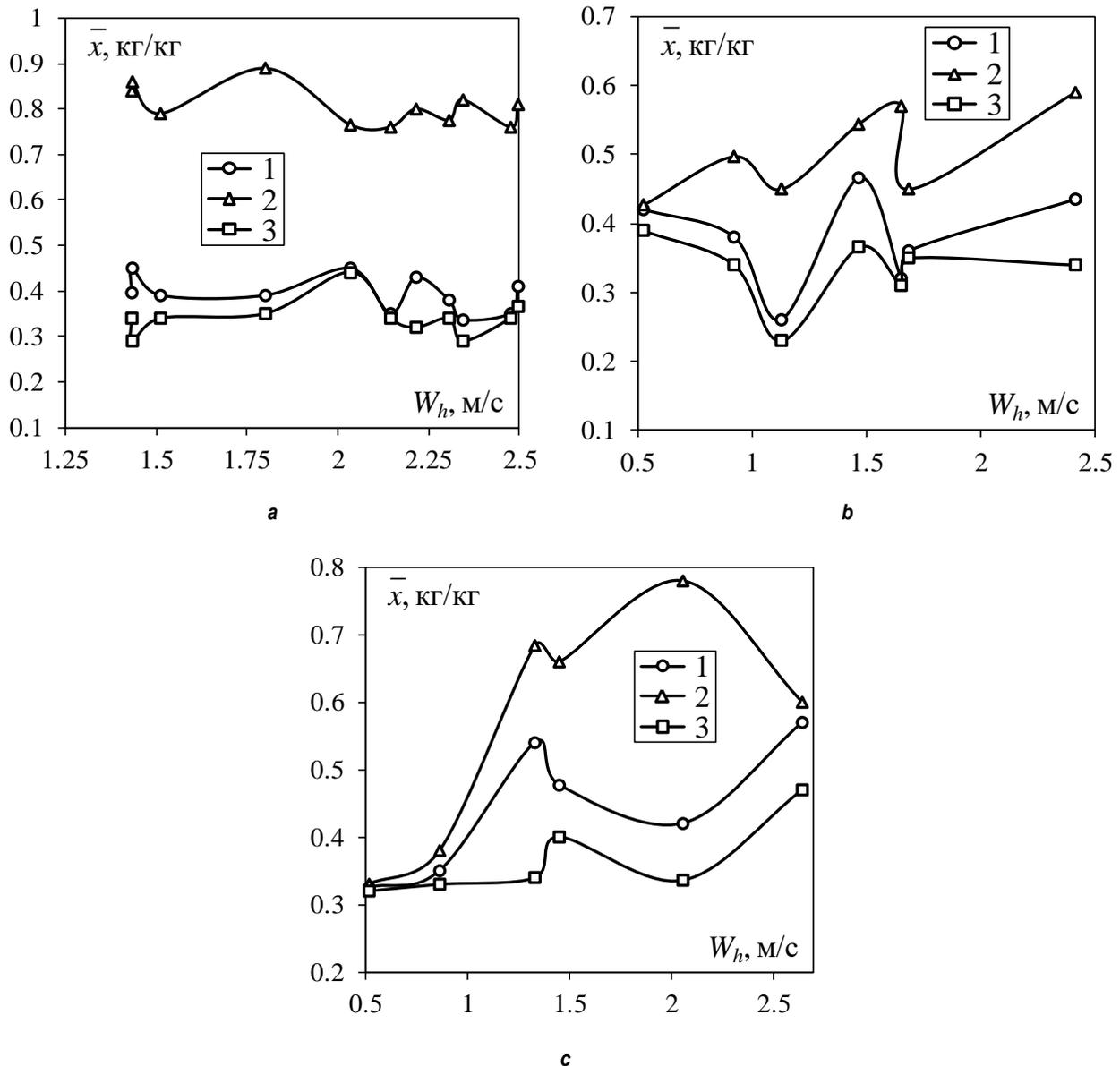


Рис. 5. Зависимость массовой доли масла в эмульсии от действительной скорости движения потока для: 1 – исходной смеси, 2 – легкой фазы, 3 – тяжелой фазы; диаметр отверстий, предназначенных для выхода тяжелой фазы d_0 , мм: а – 2,5, б – 3, с – 4,5
Fig. 5. Dependence of the mass fraction of oil in emulsion on the actual flow velocity for: 1 – initial mixture, 2 – light phase, 3 – heavy phase; diameter of holes for heavy phase exit d_0 , mm: а – 2.5, б – 3, с – 4.5

П-образных элементах наблюдается при диаметре отверстий равных 2,5 мм, предназначенных для выхода тяжелой фазы. При этом средняя эффективность на одной полной ступени разделения в диапазоне скоростей движения эмульсии от 1,43 до 2,5 м/с составляет 68%. В то же время в рассматриваемом диапазоне скоростей при диаметре отверстий равном 3 мм средняя эффективность разделения составляет 23,2%, при диаметре отверстий 4,5 мм – 23,1%. Это го-

ворит о ключевом влиянии аналога эффекта Магнуса на эффективность разделения эмульсии в предлагаемых устройствах с П-образными элементами, при котором увеличивается разность давлений вблизи выходных отверстий при ее небольших диаметрах. Заметим, что увеличение действительной скорости движения потока приводит, как правило, к повышению эффективности разделения эмульсий.

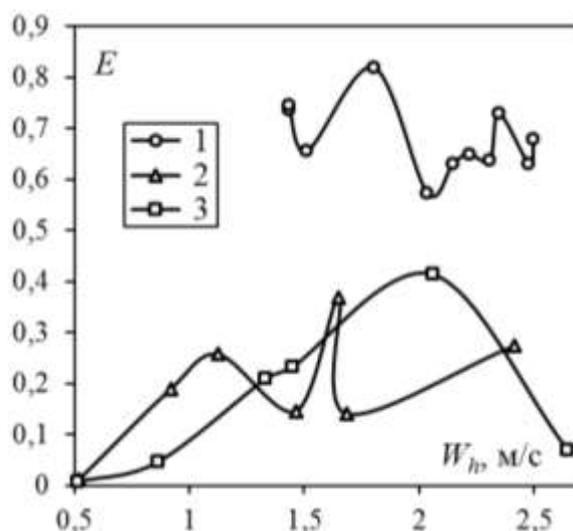


Рис. 6. Зависимость эффективности разделения эмульсии от действительной скорости движения потока при различных диаметрах отверстий для выхода тяжелой фазы d_0 , мм: 1 – 2,5; 2 – 3; 3 – 4,5
Fig. 6. Dependence of the emulsion separation efficiency on the actual flow velocity at different diameters of the heavy phase exit holes d_0 , mm: 1 – 2.5; 2 – 3; 3 – 4.5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования по оценке эффективности разделения эмульсий в предлагаемых сепараторах показывают возможности относительно высокого качества разделения на одной ступени устройства с П-образными элементами при ее высокой пропускной способности. Поэтому использование предлагаемых устройств для разделения водонефтяных эмульсий значительно увеличит производительность установок при простом аппаратном оформлении аппаратов. Следует отметить, что проведенные экспериментальные исследования позволят подобрать модель

турбулентности для расчета в таких программах как Ansys Fluent или FlowVision, которая будет наиболее адекватно описывать процесс разделения подобных эмульсий. Эксперименты доказали возможность получения высоких значений эффективности. Следовательно, правильный подбор технологических параметров (среднерасходная скорость, концентрация) и размеров характерных элементов предлагаемого устройства позволит определиться с конструкцией прямоугольного сепаратора, например, рассчитать количество ступеней для достижения требуемой эффективности разделения или определить размер сепарационных элементов.

Список литературы

1. Лаптедутьче Н.К., Сергеева Е.С. Пути оптимизации системы очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2007. № 11–12. С. 99–104.
2. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Шарипов И.И., Данг Суан Винь, Харьков В.В. Интен-сификация очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов в отстойниках // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. № 6. С. 64–67.
3. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Данг Суан Винь. Моделирование процесса разделения водонефтяной эмульсии в прямоугольном сепараторе // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 3. С. 65–71.
4. Мелихов А.В., Тупик Ю.В. Сепарация нефти на плавучих платформах // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: сб. матер. III Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Омск, 7–8 февраля 2019 г.). Омск: Изд-во СибАДИ, 2019. С. 23–26.
5. Jiang Wen-ming, Chen Yi-mei, Chen Ming-can, Liu Xiao-li, Liu Yang, Wang Tianyu, et al. Removal of emulsified oil from polymer-flooding sewage by an integrated apparatus including EC and separation process // Separation and Purification Technology. 2019. Vol. 211. P. 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.069>
6. Zhang Haoran, Liang Yongtu, Yan Xiaohan, Wang Bohong, Ning Wang. Simulation on water and sand separation from crude oil in settling tanks based on the particle model // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. Vol. 156. P. 366–372. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.012>



7. Ochowiak M., Matuszak M., Włodarczak S., Ancukiewicz M., Krupińska A. The modified swirl sedimentation tanks for water purification // *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 189. P. 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.023>
8. Shah M.T., Parmar H.B., Rhyne L.D., Kalli C., Utikar R.P., Pareek V.K. A novel settling tank for produced water treatment: CFD simulations and PIV experiments // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 182. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106352>
9. Zinurov V., Sharipov I., Dmitrieva O., Madyshev I. The experimental study of increasing the efficiency of emulsion separation // *Key Trends in Transportation Innovation: E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706001>
10. Дремичева Е.С., Шамсутдинов Э.В. Интенсификация седиментационной очистки сточных вод от нефтепродуктов // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2018. № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2018.23.1.3-8>
11. Гамзаева Н.Х. Идентификация модели осаждения твердой частицы в гравитационном сепараторе // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2020. Т. 13. № 1. С. 46–52. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0156>
12. Гасанов А.А., Гамзаева Н.Х. Моделирование процесса осаждения твердой частицы из потока жидкости в горизонтальном гравитационном сепараторе // *Химическая технология*. 2020. Т. 21. № 5. С. 230–235. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2020-21-5-230-235>
13. Гладий Е.А., Кемалов А.Ф., Гайнуллин В.И., Бажиров Т.С. Оценка эффективности широко применяемых реагентов-деэмульгаторов для обезвоживания нефти термохимическим способом // *Экспозиция нефть газ*. 2015. № 5. С. 16–18.
14. Лаптев А.Г., Сергеева Е.С. Водоподготовка и водоочистка в энергетике. Ч. 2. // *Вода: химия и экология*. 2011. № 4. С. 32–37.
15. Таранцев К.В., Коростелева А.В. Топливные водонефтяные эмульсии как способ утилизации нефтесодержащих вод // *Экология и промышленность России*. 2013. № 2. С. 14–17. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2013-2-14-17>
16. Кузнецова И.С., Ермакова Е.Ю., Козулина О.В., Кузнецов М.Г. Аппарат для нагрева и разделения водонефтяной эмульсии // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 17. С. 235–237.
17. Тимербаев А.С., Лищук А.Н., Таранова Л.В., Голубев Е.В., Митрошин О.Ю. Исследование особенностей процесса разделения водонефтяных эмульсий в центробежном сепараторе с крыльчаткой // *Нефтяное хозяйство*. 2014. № 12. С. 138–141.
18. Guo Guangdong, Deng Songsheng. Research on dispersed oil droplets breakage and emulsification in the dynamic oil and water hydrocyclone // *Advance Journal of Food Science and Technology*. 2013. Vol. 5. No. 8. P. 1110–1116. [Электронный ресурс]. URL: <https://studylib.net/doc/13311563/advance-journal-of-food-science-and-technology-5-8---1110...> (17.08.2020).
19. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Данг С.В., Салахова Э.И. Удаление влаги из загрязненного трансформаторного масла в прямоугольных сепараторах // *Вестник технологического университета*. 2018. Т. 21. № 11. С. 75–79.
20. Madyshev I.N., Dmitriev A.V., Vin Dang Suan. Determination of oil-water emulsions separation efficiency in the separator with a vortex flow // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709. Issue 3. P. 033025. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/709/3/033025>

References

1. Lapedulche NK, Sergeeva ES. Ways of modernization of system TPS's sewage treatment from oil products. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2007;11-12:99–104. (In Russ.)
2. Zinurov VE, Dmitriev AV, Sharipov II, Dang Suan Vinh, Kharkov VV. Efficiency of wastewater treatment from oil in thermal power stations using wash tanks. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2020;23(6):64–67. (In Russ.)
3. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Dang Suan Vinh. Modeling of separation process of water-oil emulsion in a rectangular separator. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2018;(3(39)):65–71. (In Russ.)
4. Melikhov AV, Tupik YuV. Oil separation on floating platforms. *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniia molodykh uchenykh: sbornik materialov III Mezhdunarodnoj nauch-no-prakticheskoi konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchyonykh = Fundamental and Applied Research of Young Scientists: Collected articles of III International scientific and practical conference of students, postgraduate students and young scientists*. 7–8 February 2019, Omsk. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University; 2019, p. 23–26. (In Russ.)
5. Jiang Wen-ming, Chen Yi-mei, Chen Ming-can, Liu Xiao-li, Liu Yang, Wang Tianyu, et al. Removal of emulsified oil from polymer-flooding sewage by an integrated apparatus including EC and separation process. *Separation and Purification Technology*. 2019;211:259–268. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.069>
6. Zhang Haoran, Liang Yongtu, Yan Xiaohan, Wang Bohong, Ning Wang. Simulation on water and sand separation from crude oil in settling tanks based on the particle model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017;156:366–372. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.012>
7. Ochowiak M, Matuszak M, Włodarczak S, Ancukiewicz M, Krupińska A. The modified swirl sedimentation tanks for water purification. *Journal of Environmental Management*. 2017;189:22–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.023>
8. Shah MT, Parmar HB, Rhyne LD, Kalli C, Utikar RP, Pareek VK. A novel settling tank for produced water treatment: CFD simulations and PIV experiments. *Journal*

- of *Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 182. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106352>
9. Zinurov V, Sharipov I, Dmitrieva O, Madyshev I. The experimental study of increasing the efficiency of emulsion separation. In: *Key Trends in Transportation Innovation: E3S Web of Conferences*. 2020;157. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706001>
10. Dremicheva ES, Shamsutdinov EV. Intensification of sedimentation treatment of wastewater from oil products. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology*. 2018;1:3–8. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2018.23.1.3-8>
11. Gamzaeva NK. Identification of the model of solid particle deposition in the gravity separator. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Himiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2020;13(1):46–52. (In Russ.) <https://doi:10.17516/1998-2836-0156>
12. Gasanov AA, Gamzaeva NH. Simulation of solid particle deposition from a liquid flow in a horizontal gravity separator. *Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2020;21(5):230–235. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2020-21-5-230-235>
13. Glady EA, Kemalov AF, Gainullin VI, Bazhirov TS. Assessment of the effectiveness of a widely used reagent demulsifier in the thermochemical dehydration of oil. *Ekspozitsiya neft' gaz = Exposition Oil & Gas*. 2015;5:16–18. (In Russ.)
14. Laptev AG, Sergeeva ES. Water treatment and wastewater purification in power systems. Part 2. *Voda: himiya i ekologiya*. 2011;(4):32–37. (In Russ.)
15. Tarantsev KV, Korostelev AV. Fuel oil emulsions as

- method of oil containing waters recovery. *Ekologia i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2013;2:14–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2013-2-14-17>
16. Kuznecova IS, Ermakova EYu, Kozulina OV, Kuznecov MG. Apparatus for water-oil emulsion heating and separation. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013;16(17):235–237. (In Russ.)
17. Timerbaev AS, Lishchuk AN, Taranova LV, Golubev EV, Mitroshin OYu. Research in specifics of separation of oil-in-water emulsions inside of a centrifugal separator with impeller. *Neftyanoe Khozyaistvo = Oil Industry*. 2014;12:138–141. (In Russ.)
18. Guo Guangdong, Deng Songsheng. Research on dispersed oil droplets breakage and emulsification in the dynamic oil and water hydrocyclone. *Advance Journal of Food Science and Technology*. 2013;5(8):1110–1116. Available from: <https://studylib.net/doc/13311563/advance-journal-of-food-science-and-technology-5-8---1110> [Accessed 17th August 2020].
19. Zinurov VE, Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Dang SV, Salakhova EI. Moisture removal from the polluted transformer oil in rectangular separators. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018;21(11):75–79. (In Russ.)
20. Madyshev IN, Dmitriev AV, Vin Dang Suan. Determination of oil-water emulsions separation efficiency in the separator with a vortex flow. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;709(3): 033025. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/709/3/033025>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мадышев Ильнур Наилович,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
кафедра оборудования пищевых производств,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, Россия;
e-mail: ilnur_91@mail.ru

Зинуров Вадим Эдуардович,

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

Дмитриев Андрей Владимирович,

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Vadim E. Zinurov,

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

Andrey V. Dmitriev,

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



Данг Суан Винь,
аспирант,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: ssonvinh@gmail.com

Dang Xuan Vinh,
Postgraduate Student,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: ssonvinh@gmail.com

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

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.10.2020; одобрена после рецензирования 26.11.2020; принята к публикации 20.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 12.10.2020; approved after reviewing 26.11.2020; accepted for publication 20.12.2020.



Исследование и разработка системы автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения технических средств охраны

© М.А. Миронов, С.А. Козлов

АО «Научно-производственный комплекс «Дедал», г. Дубна, Россия

Резюме: Целью работы является разработка методики для проектирования системы автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения технических средств охраны. Объектом исследования является система автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей. Приведены накопители энергии, получившие широкое распространение при проектировании систем электропитания для электроснабжения технических средств охраны. Использована методика проектирования системы электропитания, в которой учтено интегральное влияние солнечной инсоляции, температуры окружающей среды в диапазоне от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$, фотоэлектрического модуля и аккумуляторной батареи; мощности фотоэлектрического модуля; требований автономности работы технических средств охраны; электрических характеристик солнечного контроллера заряда (номинального напряжения холостого хода и номинального тока заряда). Для расчета суммарной солнечной инсоляции, приходящейся на поверхность фотоэлектрического модуля, использована модель Кастрова для расчета прямого солнечного излучения, модель Берлаге для расчета рассеянной солнечной энергии и модель Берлянда для расчета инсоляции в условиях облачности. Проведены исследования литий-титанатных аккумуляторных батарей в климатической камере и разработана соответствующая математическая модель зависимости емкости аккумуляторной батареи от температуры. Для определения солнечной инсоляции, падающей на наклонную поверхность фотоэлектрического модуля, разработано программное обеспечение на языке программирования C#. Спроектированная система электропитания на основе фотоэлектрического модуля обеспечивает автономное бесперебойное непрерывное электропитание аппаратуры при постоянном потреблении техническими средствами охраны не более $115,2 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ в сутки. Результаты работы могут быть использованы при разработке системы автономного электропитания для электроснабжения технических средств охраны, безопасности, контроля.

Ключевые слова: система автономного электропитания, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрический модуль, аккумуляторные батареи, технические средства охраны

Для цитирования: Миронов М.А., Козлов С.А. Исследование и разработка системы автономного электропитания на основе фотоэлектрических преобразователей для электроснабжения технических средств охраны. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1243–1254. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1243-1254>

Research and development of a PV converter-based stand-alone power supply system for technical security equipment power supply

Mikhail A. Mironov, Sergei A. Kozlov

Dedal Joint Stock Company, Dubna, Russia

Abstract: The purpose of the work is to develop a methodology for designing a stand-alone power supply system based on photovoltaic (PV) converters for technical security equipment power supply. The object of the study is a PV converter-based stand-alone power supply system. Energy storage units, which are widely used in the designing of power supply systems for power supply of technical security equipment are presented. A methodology for designing a power supply system is used, which takes into account the integral effect of solar insolation, ambient temperature in the range from -40°C to $+50^{\circ}\text{C}$, temperature of a PV module and a storage battery; PV module capacity; requirements for independent operation of technical security equipment; electrical characteristics of the solar charge controller (rated open-circuit voltage and rated charge current). To calculate the total solar insolation arriving at the surface of a photovoltaic module, the Kastrov model is used for calculating direct solar radiation; the Berlage model is used for calculating the scattered solar energy and the Berland model is used for calculating insolation in cloudy conditions. The studies of lithium-titanate stor-

age batteries have been carried out in the climate chamber and a corresponding mathematical model has been developed for the temperature-dependent capacity of the battery. To determine solar insolation falling on the tilted surface of the PV module the software has been developed in the C# programming language. The designed PV module-based power supply system provides an independent uninterrupted continuous power supply of equipment under constant consumption of no more than 115.2 Wh per day by technical security equipment. The results of the work can be used in the development of a stand-alone power supply system for power supply of technical security equipment, security and control.

Keywords: stand-alone power supply system, renewable energy sources, photovoltaic (PV) module, (storage) batteries, technical security equipment

For citation: Mironov MA, Kozlov SA. Research and development of a PV converter-based stand-alone power supply system for technical security equipment power supply. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1243–1254. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1243-1254>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания относительно компактного автономного источника электропитания с выходной электрической мощностью от мВт до нескольких кВт, для электроснабжения электронной аппаратуры технических средств охраны (ТСО) является достаточно актуальной. Потребность в таких источниках электропитания исчисляется множеством устройств. Это, например, автономные системы телевизионного наблюдения, периметровые и объектовые средства обнаружения нарушителей, радиолокационные станции, средства контроля доступа и управления, системы сбора и обработки данных и т.д.

Основными источниками электроэнергии для автономных потребителей являются дизель-генераторные установки (ДГУ), что обусловлено многими причинами [1, 2]. ДГУ обладает следующим рядом значительных преимуществ [3]:

- универсальность применения;
- низкая стоимость оборудования;
- достаточная надежность и долговечность;
- дизельное топливо используется в широком диапазоне рабочих температур от -50 до +50°C.

Недостатки дизель-генераторных установок в составе системы автономного электропитания проявляются при работе на нагрузку, отличную от номинальной, когда происходит повышение удельного расхода топлива, масла и воздуха, что приводит к повышенному

износу узлов и деталей ДГУ [4]. Немаловажным является негативный экологический фактор использования дизель-генераторных установок; за последнее время остроту приобрели проблемы нефтегазового загрязнения территорий, а также вывоза миллионов бочек из-под горюче-смазочных материалов [5].

Одним из альтернативных решений данной проблемы может быть применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в качестве источника генерации. В настоящее время во всем мире наблюдается тенденция к росту использования возобновляемых источников энергии для электропитания территориально распределенных и удаленных объектов инфраструктуры [6–8]. По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, прирост мощности систем автономного электропитания (САЭ) на основе фотоэлектрической энергии с 2010 по 2019 год составил в среднем 28%¹. График прироста мощности приведен на рис. 1.

ТИПОВАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Солнечная энергия занимает особое место среди всех возобновляемых видов энергии. Практическое применение источника электрической энергии на основе фотоэлектрических модулей (ФМ) дает возможность создать систему практически любой сложности, не зависящую от сети централизованного электроснабжения. Вместе с тем известно,

¹Renewable capacity statistics 2020 // International Renewable Energy Agency [Электронный ресурс]. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf (15.07.2020).

что одной из основных проблем возобновляемой энергетики является непостоянство выработки (волатильность) электроэнергии генерирующей установкой. Надежность системы автономного электропитания может быть повышена путем добавления в систему накопителя энергии [9, 10]. Широкое распространение в САЭ получили следующие накопители энергии [11, 12]:

- герметичные необслуживаемые свинцово-кислотные (GEL, OPzS, OPzV, AGM);
- литий-ионные (Li-ion);
- литий-железно-фосфатные (LiFePO_4 , LFP);
- литий-титанатные ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO).

Выбор типа аккумуляторной батареи (АКБ) для системы автономного электропитания зависит от условий эксплуатации изделия (Крайний Север, тропики, умеренный климат), необходимого числа циклов заряда/разряда, требований автономности, срока службы и т.д.² На рис. 2 представлена зависимость типа аккумуляторной батареи от числа рабочих циклов заряда/разряда при глубине разряда 80%.

Одним из перспективных накопителей энергии является литий-титанатная аккумуляторная батарея ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO), которая

обеспечивает более 40000 циклов заряда/разряда при сохранении 80% от емкости батареи³. Однако внедрение в системы автономного электропитания данных накопителей энергии происходит медленно ввиду их пока высокой стоимости.

САЭ, помимо фотоэлектрических модулей и аккумуляторных батарей, является типичной, содержит контроллер заряда АКБ и устройство защиты АКБ, предназначенных для преобразования напряжения фотоэлектрических модулей в напряжение заряда аккумуляторных батарей и ее защиты от глубокого разряда, соответственно. Типовая структурная схема системы автономного электропитания приведена на рис. 3.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Рассмотрим основные этапы методики проектирования САЭ на основе фотоэлектрических модулей для электроснабжения ТСО.

1. Расчет потребления мощности электроприборами ТСО за сутки производится по следующему выражению:

$$P_{\text{сумм.сут.}} = \sum 24P_n, \quad (1)$$

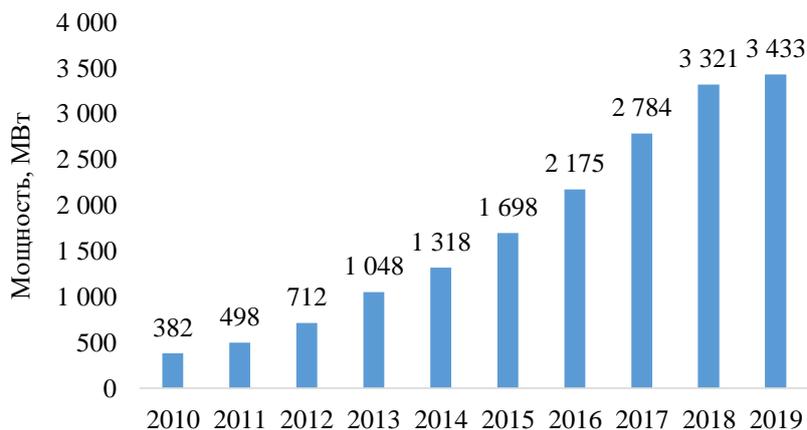


Рис. 1. Прирост мощности систем автономного электропитания на основе фотоэлектрических модулей в мире
Fig. 1. Capacity gain of PV module-based stand-alone power supply systems in the world

²ГОСТ Р МЭК 61427-1-2014. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи для возобновляемых источников энергии. Общие требования и методы испытаний. Часть 1. Применение в автономных фотоэлектрических энергетических системах. Введ. 2016-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 27 с.

³Product lineup // TOSHIBA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scib.jp/en/product/cell.htm> (20.07.2020).

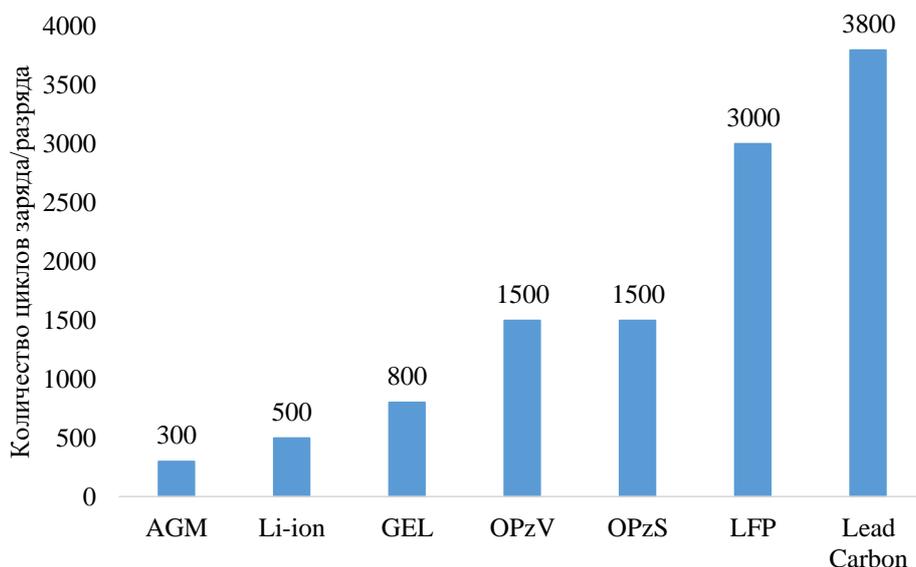


Рис. 2. Зависимость типа аккумуляторной батареи от количества циклов заряда/разряда
 Fig. 2. Battery type vs number of charge/discharge cycles

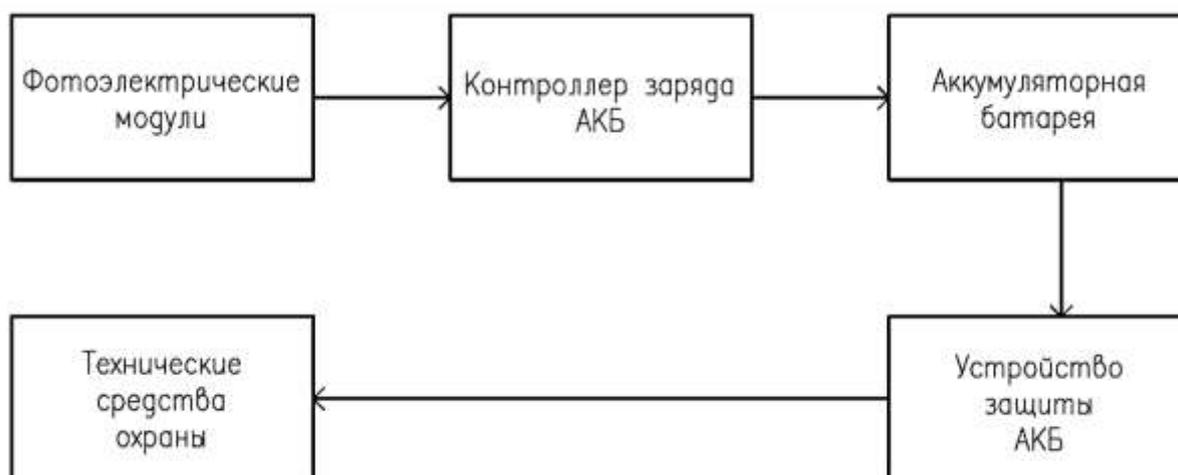


Рис. 3. Типовая структурная схема системы автономного электропитания
 Fig. 3. Typical block diagram of a stand-alone power supply system

где $P_{\text{сумм.сут.}}$ – суммарное потребление мощности электроприборами ТСО за сутки, Вт·ч; P_n – номинальная мощность ТСО, Вт.

2. Расчет емкости аккумуляторной батареи производится исходя из требований автономной работы ТСО (только за счет запасенной в АКБ энергии) и глубины разряда аккумуляторной батареи:

$$C_{аб} \geq \frac{P_{\text{сумм.сут.}} \cdot t_a}{U_{аб} \cdot K_T \cdot K_r}, \quad (2)$$

где $C_{аб}$ – емкость аккумуляторной батареи, Ач; t_a – время автономной работы ТСО, сут; $U_{аб}$ – напряжение аккумуляторной батареи, В; K_T – коэффициент зависимости емкости аккумуляторной батареи от температуры; K_r – глубина разряда аккумуляторной батареи.

Напряжение аккумуляторной батареи определяется по данным технической спецификации.

В настоящей работе для определения коэффициента зависимости емкости АКБ от



температуры проведены испытания литий-титанатной аккумуляторной батареи в климатической камере (тепла и холода). В результате обработки экспериментальных данных определена аппроксимирующая зависимость коэффициента K_T литий-титанатной АКБ (ячейки SCiB) от температуры (в диапазоне от -40°C до $+50^\circ\text{C}$):

$$K_T = 0,9011 + 0,0048 \cdot T_{АКБ} - 2 \cdot 10^{-5} \cdot T_{АКБ}^2 - 4 \cdot 10^{-7} \cdot T_{АКБ}^3, \quad (3)$$

где $T_{АКБ}$ – температура аккумуляторной батареи, $^\circ\text{C}$.

3. Расчет необходимой мощности фотоэлектрических модулей:

$$P_{см} \geq \frac{P_{сумм.сут.} \cdot W_{сн}}{W_{инс} \cdot \eta_{конт} \times \left[1 + \frac{k_p (\bar{T} + \Delta T_{фм} - T_{СНИ})}{100\%} \right]}, \quad (4)$$

где $P_{см}$ – мощность фотоэлектрических модулей, необходимая для бесперебойной работы ТСО, Вт; $W_{сн}$ – солнечная постоянная при АМ 1,5, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $W_{инс}$ – среднемесячная инсоляция, падающая на поверхность ФМ, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ в сут; $\eta_{конт}$ – КПД контроллера заряда аккумуляторной батареи; k_p – температурный коэффициент P_{mpp} , $\%/^\circ\text{C}$; \bar{T} – среднемесячная температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; $\Delta T_{фм}$ – изменение температуры поверхности ФМ, $^\circ\text{C}$; $T_{СНИ}$ – температура при стандартных условиях испытания ФМ, $^\circ\text{C}$.

КПД контроллера заряда АКБ и температурный коэффициент P_{mpp} определяются по данным технических спецификаций оборудования.

Изменения температуры поверхности ФМ $\Delta T_{фм}$ рассчитывается по модели, предложенной С.Г. Обуховым, И.А. Плотниковым [13]:

$$\Delta T_{фм} = 0,0283 \cdot W_{инс} - 0,0058 \cdot W_{инс} \times V + 0,0005 \cdot W_{инс} \cdot V^2, \quad (5)$$

где V – среднемесячная скорость ветра в месте установки САЭ, м/с.

Примечание. При круглогодичной эксплуатации системы автономного электропитания показатели: $W_{инс}$, V , $\Delta T_{фм}$, \bar{T} определяются для того месяца, в котором наблюдалась наименьшая среднемесячная солнечная инсоляция за год.

Получение модели солнечной инсоляции, применяемой для расчета необходимой мощности ФМ для обеспечения электропитания нагрузки САЭ, является актуальной задачей. Исследованиям в данной области посвящены многие работы [14–19].

Для определения среднемесячной солнечной инсоляции, падающей на поверхность фотоэлектрического модуля $W_{инс}$, воспользуемся выражением:

$$W_{инс} = \sum_{n=1}^n W_n, \quad (6)$$

где W_n – солнечная инсоляция за сутки, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; n – порядковый номер дня месяца, в котором наблюдалась наименьшая среднемесячная солнечная инсоляция за год.

Солнечная инсоляция за сутки определяется как

$$W_n = \frac{12}{\pi} \cdot (10^{-3}) \cdot \int_{\omega_k}^{\omega_n} Q_{накл} d\omega, \quad (7)$$

где $Q_{накл}$ – суммарная солнечная инсоляция, падающая на наклонную плоскость фотоэлектрического модуля, $\text{Вт}/\text{м}^2$; ω_n и ω_k – часовые углы Солнца, соответствующие моментам времени восхода и заката.

Суммарная солнечная инсоляция, падающая на наклонную плоскость фотоэлектрического модуля, вычисляется по формуле⁴:

⁴Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учеб. пособ. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 128 с.

$$Q_{\text{накл}} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{рас}} + Q_{\text{отр}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – прямое солнечное излучение, поступающее на наклонную поверхность ФМ, Вт/м²; $Q_{\text{рас}}$ – рассеянная солнечная инсоляция, падающая на наклонную плоскость ФМ, Вт/м²; $Q_{\text{отр}}$ – излучение, отраженное от поверхности земли и поступающее на поверхность ФМ, Вт/м².

Первое слагаемое в выражении (8) определяется с использованием формулы Кастрова:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{опт}} \cdot \cos \theta = \frac{Q_0 \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha + c} \cdot \cos \theta, \quad (9)$$

где $Q_{\text{опт}}$ – прямое солнечное излучение, поступающее на ортогональную солнечным лучам поверхность ФМ, Вт/м²; θ – угол падения прямого солнечного излучения на плоскость фотоэлектрического модуля, рад; Q_0 – солнечная постоянная при АМ0, 1370 Вт/м²; α – высота Солнца, рад; c – величина степени прозрачности атмосферы.

Для определения угла падения прямого солнечного излучения на поверхность ФМ используется выражение⁵:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \cos s \cdot (\sin \varphi - \cos \varphi \cdot \sin s \cdot \cos \gamma \times \\ & \times \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega) + \cos \delta \cdot \sin s \times \\ & \times (\sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \sin \gamma \cdot \sin \omega), \end{aligned} \quad (10)$$

где δ – склонение Солнца, рад; φ – географическая широта расположения поверхности ФМ, рад; s – угол наклона ФМ к горизонту, рад; γ – азимут ФМ, рад; ω – часовой угол Солнца, рад.

Склонение Солнца находится по формуле:

$$\delta = \arcsin \{ \sin \beta \cdot \cos \varepsilon + \cos \beta \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \lambda \}, \quad (11)$$

где β – широта Солнца ($\beta = 0$); ε – наклон эклиптики; λ – долгота Солнца.

Значение среднего наклона эклиптики к экватору задается формулой:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 23^{\circ}27'08,26'' - 46,845''T - \\ & - 0,00059''T^2 + 0,001811''T^3, \end{aligned} \quad (12)$$

где T – число юлианских веков, прошедших с эпохи 5 января 1900 г.

Высоту Солнца можно найти из решения выражения⁶:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega. \quad (13)$$

Рассеянную солнечную инсоляцию $Q_{\text{рас}}$, падающую на наклонную плоскость ФМ, определяем по выражению:

$$\begin{aligned} Q_{\text{рас}} = & Q_{\text{рас_гор}} \times \\ & \times [0,55 + 0,434 \cdot \cos \theta + 0,313 \cdot (\cos \theta)^2], \end{aligned} \quad (14)$$

где $Q_{\text{рас_гор}}$ – поток рассеянной солнечной энергии, поступающий на горизонтальную поверхность ФМ, Вт/м². Его можно вычислить по формуле Берлаге [19]:

$$Q_{\text{рас_гор}} = \frac{1}{3} \cdot (Q_0 - Q_{\text{опт}}) \cdot \sin \alpha. \quad (15)$$

Отраженное от поверхности Земли излучение $Q_{\text{отр}}$, поступающее на наклонно установленную плоскость ФМ, учитываемое в выражении (8) для суммарной солнечной инсоляции, относительно мало и в первом приближении его не учитываем.

Выражение для расчета солнечной инсоляции, падающей на плоскость ФМ в условиях облачности, запишется в виде⁷:

$$Q_{\text{накл}} = (Q_{\text{пр}} + Q_{\text{рас}}) \times [1 - (a + b \cdot n) \cdot n], \quad (16)$$

⁵Duffie J.A., Beckman W.A. Solar engineering of thermal processes. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 928 p.

⁶Duffett-Smith P., Zwart J. Practical Astronomy with your Calculator or Spreadsheet. New York: Cambridge University Press, 2011. 238 p.

⁷Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 229 с.



где a – коэффициент, зависящий от широты местности установки ФМ в составе системы автономного электропитания (см. табл. 1); $b \approx 0,38$ – коэффициент, который при всех условиях оказывается примерно одинаковым; n – количество облаков ($n = 0$ при отсутствии облаков, $n = 1$ при сплошной облачности).

На основе вышеприведенных соотношений (6)–(16) для определения среднемесячной солнечной инсоляции, падающей на поверхность ФМ, разработано программное обеспечение на языке программирования C#, представленное на рис. 4.

Сравнивая полученные результаты с данными по солнечной инсоляции проекта NASA «Prediction Of Worldwide Energy Resources»⁸, выявлена приемлемая погрешность расчета.

Проведенные расчеты показали, что математическая модель поступления солнечной инсоляции на наклонную плоскость ФМ адекватна. Средняя относительная погрешность

модели относительно данных проекта NASA не превышает 11%, что вполне пригодно для проведения инженерных расчетов.

4. Расчет основных параметров солнечного контроллера заряда с функцией поиска точки максимальной мощности.

Номинальный ток заряда рассчитывается по формуле:

$$I_{з.аб} \geq \frac{P_{см}}{U_{аб}}, \quad (17)$$

где $I_{з.аб}$ – зарядный ток аккумуляторной батареи, А.

Номинальное напряжение холостого хода выбирается исходя из характеристик и способа соединения фотоэлектрических модулей:

$$U_{хх.кз} \geq U_{хх}, \quad (18)$$

Таблица 1. Зависимость коэффициента « a » от широты расположения систем автономного электропитания
Table 1. Coefficient « a » vs location latitude of a stand-alone power supply system

ϕ	0	10	20	30	40	50	60	70	75	80	85
a	0,38	0,4	0,37	0,36	0,38	0,4	0,36	0,18	0,16	0,15	0,14

Рис. 4. Программное обеспечение для расчета солнечной инсоляции, падающей на фотоэлектрические модули
Fig. 4. Software for calculating solar insolation falling on PV modules

⁸NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources [Электронный ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov> (20.07.2020).

где $U_{ок.кз}$ – номинальное напряжение холостого хода контроллера заряда, В; $U_{ос}$ – напряжение холостого хода фотоэлектрического массива, В.

На базе разработанной методики спроектирована САЭ на основе возобновляемого источника энергии в виде фотоэлектрического модуля (рис. 5) для электроснабжения технических средств охраны, в течение года САЭ обеспечивает круглосуточное бесперебойное питание аппаратуры ТСО, при потреблении не более 115,2 Вт·ч в сутки.

Для эксплуатации и проведения предварительных испытаний был выбран полигон «Альтернативная энергетика» в г. Дубна Московской области, входящий в инновационно-промышленный кластер «Возобновляемые источники энергии», находящийся по следующим координатам: 56.730821° N, 37.118088° E.

В качестве электрической нагрузки в САЭ используются ТСО: вибрационное средство обнаружения «Дельфин-М»⁹, предназначенное для охраны периметра полигона «Альтернативная энергетика», и 4 радиоволновых

объемных извещателя «Агат-СП-5У/1»¹⁰, предназначенных для обнаружения посторонних лиц на территории объекта; общее суточное потребление ТСО составляет 115,2 Вт·ч или мощность потребления 4,8 Вт.

Исходя из методики, представленной в выражениях (1)–(18), подобрано следующее оборудование:

1) литий-титанатная АКБ с формулой 6s3p с использованием ячейки Toshiba (23 Ач 2,3 В);

2) гетероструктурный фотоэлектрический модуль HVL119, обеспечивающий лучшие характеристики в условиях частичной и сплошной облачности в Московской области;

3) солнечный контроллер заряда Victron Energy SmartSolar MPPT 75/15, обеспечивающий программируемые параметры заряда-разряда литий-титанатного АКБ: напряжение стадии Bulk, напряжение стадии Absorption, напряжение стадии Float, время стадии Absorption, ток заряда аккумулятора, напряжение отключения нагрузки аккумулятора, температурную компенсацию.



Рис. 5. Система автономного электропитания для электроснабжения технических средств охраны
Fig. 5. Stand-alone power supply system for security equipment power supply

⁹Периметровые и объектовые средства обнаружения [Электронный ресурс]. URL: <https://dedal.ru/projects/vibratsionnye/delfin-m.html> (16.07.2020).

¹⁰Однопозиционные объемные извещатели [Электронный ресурс]. URL: <https://umirs.ru/catalog/one-position-radio-signals/agat-sp5u-1/> (16.07.2020).



Таблица 2. Технические характеристики систем автономного электропитания
Table 2. Technical specifications of stand-alone power supply systems

Характеристики	Значение
Номинальная нагрузка, Вт	4,8
Максимальная кратковременная нагрузка, Вт	200
Емкость аккумуляторной батареи, Ач	69
Номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В	13,8
Время автономной работы от аккумуляторной батареи, сут	не менее 6
Номинальная мощность фотоэлектрического модуля, Вт	119,6
Напряжение точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля, В	28,9
Ток точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля, А	4,14
КПД ячейки фотоэлектрического модуля, %	23,5
Номинальный ток заряда солнечного контроллера заряда, А	15
Максимальное напряжение солнечного контроллера заряда, В	75
Алгоритм заряда солнечного контроллера заряда	Трехстадийный
Рабочая температуры, °С	-40 до +50

Технические характеристики спроектированной САЭ для электроснабжения ТСО сведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проектирование энергоэффективных автономных систем электропитания на основе фотоэлектрических модулей для электроснабжения технических средств охраны является актуальным. Показаны тенденции роста ВИЭ в системах электропитания для автономных потребителей.

2. Разработана методика проектирования САЭ, в которой учтено интегральное влияние солнечной инсоляции, температуры окружающей среды в диапазоне от -40 °С до +50 °С, фотоэлектрического модуля и аккумуляторной батареи; мощности фотоэлектрического модуля; требований автономности работы технических средств охраны; электрических характеристик солнечного контроллера заряда (номинального напряжения холостого хо-

да и номинального тока заряда).

3. Получена аппроксимирующая модель зависимости емкости литий-титанатной аккумуляторной батареи от температуры. На основе полученной модели солнечной инсоляции с использованием модели Кастрова для расчета прямого солнечного излучения, модели Берлаге для расчета рассеянной солнечной энергии и модели Берлянда для расчета инсоляции в условиях облачности, разработано программное обеспечение на языке программирования C#.

4. Спроектирована система электропитания на основе фотоэлектрического модуля, которая обеспечивает автономное бесперебойное электропитание аппаратуры при постоянном суточном потреблении ТСО не более 115,2 Вт·ч. Адекватность методики расчета подтверждена продолжительными натурными испытаниями реальной САЭ на экспериментальном полигоне.

Список литературы

1. Обухов С.Г., Плотников И.А. Экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 6. С. 95–102.
2. Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Ербаев Е.Т., Тулепова Г.Н., Жексембиева Н.С. Гибридная система электроснабжения с объединенным звеном постоянного тока // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3. С. 96–100.
3. Волохов Н.А., Рындин И.А., Космынина Н.М. анализ и оценка эффективности использования различных источников электроэнергии в условиях Арктики // Творчество – шаг в успешное будущее. Арктика и ее основание: матер. IX Всерос. науч. молодеж. конф.

- с междунар. участием с элементами науч. шк. им. проф. М.К. Коровина. 2016. Томск. С. 283–285.
4. Абсалямов Д.Р., Аитов Р.Н., Марченко М.А. Повышение энергоэффективности при эксплуатации системы электроснабжения наземных комплексов космического назначения путем применения дизель-генераторных установок с переменной частотой вращения // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2017. № 658. С. 85–92.
5. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: экология и экономика. 2013. № 2. С. 18–27.
6. Amoah A., Kwablah E., Korle K., Offei D. Renewable energy consumption in Africa: the role of economic well-

being and economic freedom // *Energy, Sustainability and Society*. 2020. Vol. 10.
<https://doi.org/10.1186/s13705-020-00264-3>

7. Arndt C., Hartley F., Ireland G., Mahrt K., Merven B., Wright J. Developments in variable renewable energy and implications for developing countries // *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. 2018. Vol. 5. P. 240–246.
<https://doi.org/10.1007/s40518-018-0121-9>

8. Mitrova T., Melnikov Yu. Energy transition in Russia // *Energy Transitions*. 2019. Vol. 3. P. 73–80.
<https://doi.org/10.1007/s41825-019-00016-8>

9. Годин П.А., Годин М.А. Децентрализованное энергоснабжение объектов малой энергоемкости на основе гибридной энергоустановки с системой аккумулирования энергии // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 30. С. 241–246.

10. Ben Elghali S., Outbib R., Benbouzid M. Selecting and optimal sizing of hybridized energy storage systems for tidal energy integration into power grid // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2019. Vol. 7. P. 113–122. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0442-0>

11. Агафонов Д.В., Эрк А.Ф. Выбор химического источника тока для буферной батареи возобновляемых источников энергии // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 95. С. 26–33.
<https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10028>

12. Yao Liangzhong, Yang Bo, Cui Hongfen, Zhuang Jun, Ye Jilei, Xue Jinhua. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016. Vol. 4. Issue 4. P. 519–528.
<https://doi.org/10.1007/s40565-016-0248-x>

13. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // *Известия Томского политехнического университета*. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 38–51.

14. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Методика оценки солнечного излучения для фотоэлектрической станции // *Известия Томского политехнического университета*. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 49–55.

15. Costa Rocha P.A., Fernandes J.L., Modolo A.B., Pontes Lima R.J., Vieira da Silva M.E., Dias Bezerra C.A. Estimation of daily, weekly and monthly global solar radiation using ANNs and a long data set: a case study of Fortaleza, in Brazilian Northeast region // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2019. Vol. 10. P. 319–334.
<https://doi.org/10.1007/s40095-019-0313-0>

16. Sarkar M.N.I., Sifat A.I. Global solar radiation estimation from commonly available meteorological data for Bangladesh // *Renewables: Wind, Water, and Solar volume*. 2016. Vol. 3.
<https://doi.org/10.1186/s40807-016-0027-3>

17. Ng Khai Mun, Adam N.M., Inayatullah O., Ab Kadir M.Z.A. Assessment of solar radiation on diversely oriented surfaces and optimum tilts for solar absorbers in Malaysian tropical latitude // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2014. Vol. 5.
<https://doi.org/10.1007/s40095-014-0075-7>

18. Mirmasoudi S., Byrne J., Kroebe R., Johnson D., MacDonald R. A novel time-effective model for daily distributed solar radiation estimates across variable terrain // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2018. Vol. 9. P. 383–398.
<https://doi.org/10.1007/s40095-018-0279-3>

19. Бузунов А.С., Черных А.Г. Методика теоретического расчета возможных сумм солнечной радиации // *Актуальные вопросы аграрной науки*. 2015. № 17. С. 33–39.

20. Шакиров В.А. Методика оценки прихода суммарной солнечной радиации на наклонные поверхности с использованием многолетних архивов метеорологических данных // *Системы. Методы. Технологии*. 2017. № 4. С. 115–121.
<https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-115-121>

References

1. Obukhov SG, Plotnikov IA. The experimental researches of diesel generator set on variable speed. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georесursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015;326(6):95–102. (In Russ.)

2. Artyukhov II, Stepanov SF, Erbaev ET, Tulepova GN, Zhexembiyeva NS. Hybrid power supply system with a combined DC link. *Voprosy elektrotekhnologii = Journal of Electrotechnics*. 2015;3:96–100. (In Russ.)

3. Volokhov NA, Ryndin IA, Kosmynina NM. Analysis and evaluation of application efficiency of various energy sources in the Arctic. In: *Tvorchestvo – shag v uspešnoe budushchee. Artika i ee osnovanie: materialy IX Vserossiiskoi nauchnoi molodezhnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem s elementami nauchnoi shkoly imeni professora M.K. Korovina = Creativity as a step into a suc-*

cessful future. The Arctic and its foundation: proceedings of IX All-Russian scientific youth conference with international participation with the elements of the scientific school named after the Professor M.K. Korovin. Tomsk; 2016, p. 283–285. (In Russ.)

4. Absalyamov DR, Aitov RN, Marchenko MA. Improving energy efficiency under operation of ground-based space complex power supply system by using variable speed diesel generator units. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*. 2017;658:85–92. (In Russ.)

5. Sokolov Yul. Arctic: problem of the accumulated environmental damage. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2013;2:8–27. (In Russ.)

6. Amoah A, Kwablah E, Korle K, Offei D. Renewable energy consumption in Africa: the role of economic well-being and economic freedom. *Energy, Sustainability and Society*. 2020;10.



<https://doi.org/10.1186/s13705-020-00264-3>

7. Arndt C, Hartley F, Ireland G, Mahrt K, Merven B, Wright J. Developments in variable renewable energy and implications for developing countries. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. 2018;5:240–246. <https://doi.org/10.1007/s40518-018-0121-9>

8. Mitrova T, Melnikov Yu. Energy transition in Russia. *Energy Transitions*. 2019;3:73–80. <https://doi.org/10.1007/s41825-019-00016-8>

9. Godin PA, Godin MA. Decentralized power supply of small power consumption objects based on hybrid power installation with energy accumulation system. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013;30:241–246. (In Russ.)

10. Ben Elghali S, Outbib R, Benbouzid M. Selecting and optimal sizing of hybridized energy storage systems for tidal energy integration into power grid. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2019;7:113–122. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0442-0>

11. Agafonov DV, Erk AF. Choice of a chemical cell for the buffer battery within renewable energy sources. *Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018;95:26–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10028>

12. Yao Liangzhong, Yang Bo, Cui Hongfen, Zhuang Jun, Ye Jilei, Xue Jinhua. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016;4(4):519–528. <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0248-x>

13. Obukhov SG, Plotnikov IA. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(6):38–51. (In Russ.)

14. Dmitrienko VN, Lukutin BV. Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(5):49–55. (In Russ.)

15. Costa Rocha PA, Fernandes JL, Modolo AB, Pontes Lima RJ, Vieira da Silva ME, Dias Bezerra CA. Estimation of daily, weekly and monthly global solar radiation using ANNs and a long data set: a case study of Fortaleza, in Brazilian Northeast region. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2019;10:319–334. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-0313-0>

16. Sarkar MNI, Sifat AI. Global solar radiation estimation from commonly available meteorological data for Bangladesh. *Renewables: Wind, Water, and Solar volume*. 2016;3. <https://doi.org/10.1186/s40807-016-0027-3>

17. Ng Khai Mun, Adam NM, Inayatullah O, Ab Kadir MZA. Assessment of solar radiation on diversely oriented surfaces and optimum tilts for solar absorbers in Malaysian tropical latitude. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2014;5. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0075-7>

18. Mirmasoudi S, Byrne J, Kroebe R, Johnson D, MacDonald R. A novel time-effective model for daily distributed solar radiation estimates across variable terrain. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2018;9:383–398. <https://doi.org/10.1007/s40095-018-0279-3>

19. Buzunov AS, Chernykh AG. Methods theoretical calculations of the likely amount of solar radiation. *Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki = Actual issues of agrarian science*. 2015;17:33–39. (In Russ.)

20. Shakirov VA. A technique for estimating global solar radiation on inclined surfaces using multi-year archives of meteorological data. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2017;4:115–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-4-115-121>

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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Миронов Михаил Анатольевич,
ведущий инженер Отдела научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ,
АО «Научно-производственный комплекс «Дедал»,
141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 20/41, Россия;
✉ e-mail: mironov_ma@dedal.ru

Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of interests

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Mironov,
Leading Engineer of the Department of Research and Development Works,
Research and Production Complex Dedal JSC,
20/41, Zholio-Kiuri, Dubna 141980, Russia;
✉ e-mail: mironov_ma@dedal.ru

Козлов Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
исполняющий обязанности генерального директора,
АО «Научно-производственный комплекс «Дедал»,
141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 20/41, Россия;
e-mail: kozlov_sa@dedal.ru

Sergei A. Kozlov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Acting Director General,
Research and Production Complex Dedal JSC,
20/41, Zholio-Kiuri, Dubna 141980, Russia;
e-mail: kozlov_sa@dedal.ru

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 04.10.20; одобрена после рецензирования 18.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 04.10.20; approved after reviewing on 18.11.2020; accepted for publication on 18.12.2020.



Многокритериальный выбор мощности электростанций на основе возобновляемых источников энергии и местных видов топлива в составе локальной энергосистемы

© А.С. Нефедов, Т.Н. Яковкина

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

Резюме: Цель – разработать методику для многокритериального выбора мощности группы электростанций, входящих в состав локальной энергосистемы и использующих местные энергоресурсы и возобновляемые источники энергии. Для формирования альтернативных вариантов структуры генерирующих мощностей предложен подход, который заключается в задании ряда уровней мощности базовой электростанции и электростанций на основе возобновляемых источников энергии, последующем определении мощности маневренной электростанции для покрытия оставшейся части графика нагрузок. Для многокритериального сравнения альтернативных вариантов структуры генерирующих мощностей используется метод TOPSIS, модифицированный для возможности учета неопределенности предпочтений лица, принимающего решения (модификация метода заключается в использовании нечетких функций ценности на этапе нормирования оценок по критериям). Применение данной методики рассматривалось на примере Охотского района Хабаровского края. Расчетная мощность перспективных потребителей составила 69 МВт. Альтернативные варианты структуры генерирующих мощностей включают четыре типа электростанций: тепловой на местном угле, солнечной, ветряной и дизельной. В качестве критериев при многокритериальном сравнении вариантов структуры генерирующих мощностей использовались: нормированная стоимость электроэнергии, оценка экологической эффективности и оценка общественного мнения о последствиях, связанных со строительством электростанций. Представлены отдельные наиболее перспективные варианты структуры генерирующих мощностей в зависимости от значений весовых коэффициентов критериев. При большом весе критерия, отражающего экономическую эффективность, лучшей является структура с преобладанием генерации энергии от тепловой электростанции. При большом весе критериев экологической эффективности и общественного мнения лучшей является структура со значительной генерацией от возобновляемого источника энергии (солнечная электростанция). Определены коэффициенты использования установленной мощности различных типов станций при различных структурах генерирующих мощностей. Показано, что предложенная методика обеспечивает получение вариантов структуры генерирующих мощностей, соответствующих выраженным предпочтениям, с учетом неопределенности исходной информации и сценариев развития. Перспективные варианты структуры генерирующих мощностей выбраны для более детального дальнейшего исследования.

Ключевые слова: структура генерирующих мощностей, локальная энергосистема, возобновляемые источники энергии, местные энергоресурсы, многокритериальный выбор, принятие решений

Для цитирования: Нефедов А.С., Яковкина Т.Н. Многокритериальный выбор мощности электростанций на основе возобновляемых источников энергии и местных видов топлива в составе локальной энергосистемы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1255–1270. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1255-1270>

Multi-criterial choice of capacity of power plants based on renewable energy sources and local fuels within local energy system

Aleksandr S. Nefedov, Tatiana N. Yakovkina

Bratsk State University, Bratsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to develop a methodology for multi-criteria selection of the capacity of a group of power plants included in the local power system which use local energy resources and renewable energy sources. To form alternative options for the structure of generating capacities, an approach is proposed. It suggests setting of a number of power levels of the base-load generating plant and power plants using renewable energy sources with subsequent determination of the capacity of the flexing generating plant to cover the remaining part of the load schedule. For multi-criteria comparison of the alternative options of the generating capacity structure, the TOPSIS method is used, which is

modified to take into account the uncertainty of the decision-maker's preferences (the modification of the method consists in using fuzzy value functions at the stage of normalizing estimates by criteria). The application of this method is considered on the example of the Okhotsk district of the Khabarovsk territory. The estimated capacity of prospective consumers is 69 MW. Alternative options of the power generation structures include four types of power plants: local coal-fired thermal, solar, wind, and diesel. The multi-criteria comparison of generating capacity structure options is performed using the following criteria: normalized cost of electrical energy, estimation of environmental efficiency, and assessment of public opinion on the consequences of power plant construction. Some of the most promising options for the structure of generating capacities are presented, depending on the values of the weight coefficients of the criteria. If the criterion has the large weight reflecting economic efficiency, the structure with the predominance of thermal power plant energy generation is the best. If the criteria of environmental efficiency and public opinion feature large weight, the best structure is the one with significant generation from a renewable energy source (solar power plant). The coefficients of using the installed capacity of different types of power stations with different structures of generating capacities are determined. It is shown that the proposed methodology provides the obtaining of the options of the generating capacity structure that correspond to expressed preferences, taking into account the uncertainty of the initial information and development scenarios. Promising options for the structure of generating capacities are selected for more detailed further research.

Ключевые слова: структура генерирующих мощностей, локальная энергосистема, возобновляемые источники энергии, местные энергоресурсы, многокритериальный выбор, принятие решений

Keywords: structure of generating capacities, local power system, renewable energy sources, local energy resources, multi-criteria choice, decision making

For citation: Nefedov AS, Yakovkina TN. Multi-criterial choice of capacity of power plants based on renewable energy sources and local fuels within local energy system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1255–1270. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1255-1270>

ВВЕДЕНИЕ

Северо-восточные регионы России характеризуются большими запасами полезных ископаемых, имеют важное геополитическое значение, однако значительная часть этой территории не охвачена централизованным электроснабжением [1]. Районы децентрализованного электроснабжения имеют слабо развитую транспортную инфраструктуру, многозвенную схему доставки топлива для дизельных и тепловых электростанций, что существенно повышает стоимость производства электроэнергии [2, 3]. Лишь отдельные районы находятся в зоне действия локальных энергосистем с электростанциями большой мощности.

Согласно энергетической стратегии России, на период до 2035 г. повышение устойчивости и надежности энергоснабжения макрорегионов будет осуществляться с максимальным, экономически эффективным использованием местных энергетических ресурсов, возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и распределенной генерации. Особен-

ную роль должны сыграть ВИЭ и местные энергоресурсы в решении задач освоения удаленных и изолированных районов.

При планировании развития локальных энергосистем возникает проблема выбора перспективной структуры генерирующих мощностей (СГМ) – состава электростанций и их установленной мощности. В зависимости от ресурсного потенциала района, количество альтернативных вариантов может включать несколько традиционных электростанций и электростанций на основе ВИЭ. Альтернативы отличаются экономической эффективностью, воздействием на окружающую среду, технологическими особенностями. Многокритериальный выбор усложняется неопределенностью исходной информации и будущих сценариев развития района [4–6].

К настоящему времени разработаны и реализованы в виде программ для ЭВМ комплексные модели оптимизации и планирования развития энергосистем. Модельно-информационный комплекс SCANNER¹ является инструментом системных исследований

¹Макаров А.А., Веселов Ф.В., Елисеева О.А., Кулагин В.А., Малахов В.А., Митрова Т.А., Филиппов С.П. SCANNER – модельно-информационный комплекс [Электронный ресурс]. URL: https://www.eriras.ru/files/skaner_light.pdf (06.08.2020).



развития топливно-энергетического комплекса России, включающим более двух десятков математических моделей для комплексного прогнозирования и оптимизации развития энергетики страны и мира по основным стадиям преобразования энергии. Оптимизация СГМ проводится в несколько этапов. Первоначально определяются наиболее конкурентоспособные технологии производства энергии. Далее применяется модель EPOS для оптимизации развития электроэнергетики в топливно-энергетическом комплексе в ее динамической постановке. Она осуществляет экономическое ранжирование вариантов СГМ с учетом различных ограничений и учетом неопределенности по ряду экономических и экологических показателей. На завершающей фазе используется модель ELIS для формирования рациональных вариантов развития отрасли с учетом результатов оптимизации и использованием экспертных оценок.

Другим известным инструментом выбора рациональной перспективной структуры генерирующих мощностей энергосистем является программно-вычислительный комплекс СОЮЗ [7]. Оптимизация проводится на основе метода модифицированной функции Лагранжа. Комплекс СОЮЗ, помимо решения основной задачи, применяется для анализа средств обеспечения маневренности единой электроэнергетической системы, оценки эффективности мероприятий по повышению энергетической безопасности страны, многокритериального анализа вариантов развития единой электроэнергетической системы, оценки эффективности интеграции электроэнергетических систем в единую систему России. Большое развитие получили модели оптимизации состава оборудования гибридных автономных энергосистем небольшой мощности с ВИЭ [8–13]. К настоящему времени разработан комплекс моделей для определения оптимального соотношения генерирующих мощностей и вспомогательного оборудования – аккумуляторных батарей, сетевых и батарейных инверторов. Оптимизация проводится с учетом технологических особенностей работы дизельного генератора, режима аккумуляирования. Выбор состава

оборудования осуществляется по критерию нормированной стоимости электроэнергии LCOE с учетом факторов надежности и эксплуатационных показателей работы гибридной автономной энергосистемы [11], по критерию стоимости жизненного цикла гибридной автономной энергосистемы с учетом требований надежности [12]. Для оптимизации используются классические методы линейного и динамического программирования, метаэвристические алгоритмы [14, 15].

Разработаны многочисленные программные продукты для оптимизации состава оборудования гибридных автономных энергосистем. Отдельно можно выделить программы HOMER, HOGA, как обладающие наиболее широким функционалом [16–18].

Обзор моделей оптимизации СГМ показал, что учет неопределенности исходной информации и сценариев развития в условиях многокритериальности требует дальнейшего совершенствования. В статье предлагается методика выбора СГМ с использованием многокритериального метода TOPSIS, модифицированного для учета фактора неопределенности.

МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА СТРУКТУРЫ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

При решении задачи выбора СГМ локальной энергосистемы лицо или группа лиц, принимающих решение (ЛПР), может столкнуться со значительным числом альтернативных вариантов электростанций и их сочетаний на основе местных или привозных энергоресурсов, ВИЭ. Учитывая многообразие технологических особенностей электростанций, их существенные отличия в экономических, экологических характеристиках, целесообразно выделить два последовательных этапа:

1. Выделение ограниченного количества наиболее перспективных типов электростанций.
2. Выбор наиболее эффективного соотношения установленной мощности электростанций.

В рамках первого этапа ЛПР проводит многокритериальный выбор технологий про-

изводства электроэнергии, обеспечивающих наилучшие экономические и экологические характеристики. Также при рассмотрении должна быть дана предварительная экспертная оценка отношения местного населения к различным альтернативам. Это связано с процедурой прохождения общественных слушаний, а также с прецедентами вмешательства общественных и природоохранных организаций в ход строительства энергетических объектов [19–21].

Выбранные для дальнейшего анализа технологии должны обеспечивать возможность покрытия всего графика электрических нагрузок. Станции с малой маневренностью, например тепловые электростанции (ТЭС), обеспечивают покрытие базовой части графика. Станции на основе ВИЭ со стохастическим характером генерации, например солнечные (СЭС) или ветроэлектростанции (ВЭС), используются для экономии топливных и гидроэнергетических энергоресурсов. Покрытие пиковых и полупиковых частей графика отводится маневренным электростанциям – гидравлическим (ГЭС), дизельным (ДЭС), газотурбинным, газопоршневым.

Методика многокритериального выбора ограниченного количества наиболее перспективных типов электростанций представлена в работе [22]. В текущей работе рассматривает-

ся методика второго этапа, направленная на многокритериальный выбор СГМ (рис. 1).

Рассмотрим более подробно шаги предлагаемой методики.

Шаг 1. Осуществляется анализ перспективных электрических нагрузок района по схемам территориального развития, инвестиционным паспортам, энергетическим программам и стратегиям. Определяются сезонные графики электрических нагрузок. Проводится оценка местных топливных и возобновляемых энергоресурсов с использованием карт полезных ископаемых, открытых баз климатических данных.

Шаг 2. ЛПР формулирует цель и критерии выбора СГМ. Возможная иерархия целей и критериев представлена на рис. 2.

Шаг 3. Проводится формирование альтернативных вариантов СГМ с учетом технологических особенностей различных типов электростанций: маневренность, ограниченность и непостоянство поступления энергоресурсов. Подход к формированию альтернативных вариантов СГМ содержит следующую последовательность действий.

Задается уровень мощности базовой электростанции с низкой маневренностью, например ТЭС, которая будет работать с практически неизменной мощностью.

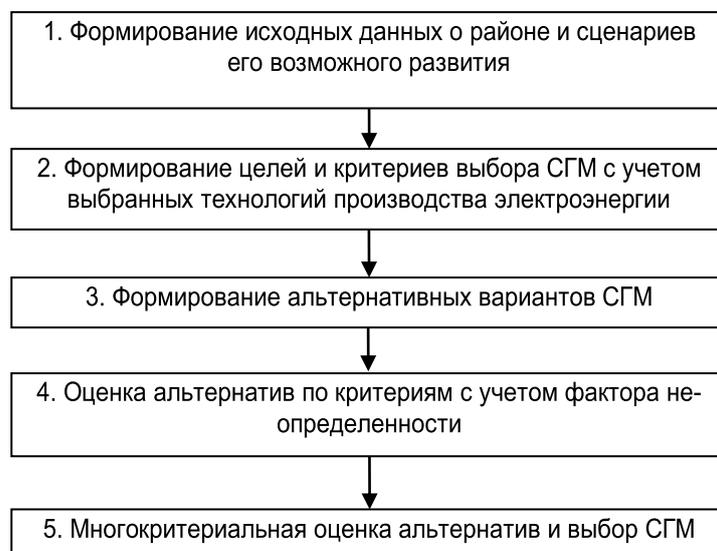


Рис. 1. Методика выбора структуры генерирующих мощностей локальной энергосистемы
Fig. 1. Methodology for choosing the structure of generating capacities of the local power system



Рис. 2. Иерархия целей и критериев выбора структуры генерирующих мощностей
Fig. 2. Hierarchy of objectives and selection criteria for the structure of generating capacities

Задается установленная мощность электростанций на основе ВИЭ со стохастическим характером генерации – ВЭС и СЭС. При этом количество ветроэнергетических установок (ВЭУ) и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) для дальнейших расчетов определяется как

$$\begin{cases} m_{ВЭУ} = P_{ВЭС}^{уст} / P_{ВЭУ}, \\ m_{ФЭП} = P_{СЭС}^{уст} / P_{ФЭП}. \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{ВЭС}^{уст}$, $P_{СЭС}^{уст}$ – заданная установленная мощность ВЭС и СЭС, кВт; $P_{ВЭУ}$ – номинальная мощность одной ВЭУ, кВт; $P_{ФЭП}$ – номинальная мощность ФЭП, кВт.

Далее определяются значения выработки мощности ВЭС и СЭС, $P_{ВЭС(t)}$ и $P_{СЭС(t)}$ для каждого часа t в течение года:

$$P_{ВЭС(t)} = K_{отк} P(v'(t)) \cdot m_{ВЭУ}, \quad (2)$$

где $K_{отк}$ – коэффициент, учитывающий класс открытости местности и ближайшей метеостанции; $P(v'(t))$ – мощность ВЭУ при скорости ветра $v'(t)$, приведенной к высоте ротора, кВт; $m_{ВЭУ}$ – количество ВЭУ, шт.

$$P_{СЭС(t)} = Q_{накл.обл(t)} \times \eta \cdot k_p \cdot S \cdot (1 - k_\eta(T(t) - 25)) \Delta t, \quad (3)$$

где $Q_{накл.обл(t)}$ – суммарная радиация, поступающая на наклонную поверхность, с учетом облачности, кВт/м²; η – КПД ФЭП, о.е.; S – площадь солнечных панелей СЭС, м²; k_p – коэффициент, учитывающий потери мощности в инверторах и проводниках, а также потери из-за загрязнения и деградации панелей; k_η – градиент изменения КПД фотоэлектрических преобразователей от температуры, о.е.; $T(t)$ – температура воздуха, °С.

Затем определяется уровень недостающей мощности $P_{пик(t)}$, которая покрывается маневренным типом электростанций. В случае, когда в качестве маневренной электростанции используется ГЭС, оценка величины $P_{ГЭС(t)}$ и запасов гидроэнергетических ресурсов проводится в соответствии с подходом, изложенным в [6]. Если в качестве маневренной электростанции используется ДЭС, оценка мощности, $P_{ДЭС(t)}$, и расхода топлива проводится с учетом допущения, что на станции установлены агрегаты одной номинальной мощности, по формулам:

$$\begin{cases} P_{ДЭС(t)} = P_{нагр(t)} - P_{баз(t)} - P_{СЭС(t)} - P_{ВЭС(t)}, \\ P_{ДЭС} = \text{Max}_{t=1}^{8760} (P_{ДЭС(t)}), \\ n_{ДЭС(t)} = P_{ДЭС(t)} / P_{ДЭС}^{100}, \\ K_{з.ДЭС(t)} = P_{ДЭС(t)} / (n_{ДЭС(t)}^{факт} \cdot P_{ДЭС}^{100}), \\ G_{ДЭС} = \sum_{t=1}^{8760} (g_{ДЭС}^{уд} \cdot P_{ДЭС}^{100} \cdot K_{з.ДЭС(t)} \cdot n_{ДЭС(t)}^{факт} \cdot 10^{-6}), \end{cases} \quad (4)$$

где $P_{ДЭС(t)}$, $P_{нагр(t)}$, $P_{баз(t)}$, $P_{СЭС(t)}$, $P_{ВЭС(t)}$ – соответственно, мощность ДЭС, нагрузки базовой электростанции, СЭС и ВЭС в момент времени t , кВт; $P_{ДЭС}$ – установленная мощность ДЭС, кВт; $n_{ДЭС(t)}$ – расчетное число дизельных агрегатов ДЭС, задействованных в момент времени t ; $n_{ДЭС(t)}^{факт}$ – округленное в большую сторону значение $n_{ДЭС(t)}$; $P_{ДЭС}^{100}$ – мощность одного агрегата ДЭС при 100% нагрузке, кВт; $K_{з,ДЭС(t)}$ – коэффициент равномерной загрузки агрегатов ДЭС в момент времени t , %; $G_{ДЭС}$ – суммарный расход топлива ДЭС, т/год; $g_{ДЭС}^{уд}$ – удельный расход одного агрегата ДЭС при $K_{з,ДЭС(t)}$, г/ч.

На рис. 3 представлен пример покрытия суточного графика нагрузки группой электростанций, иллюстрирующий вышеприведенный подход к формированию альтернативных вариантов структуры генерирующих мощностей.

Удельный расход топлива $g_{ДЭС}^{уд}$ определяется на основе паспортных характеристик дизель-генераторных установок (рис. 4).

$$g_{ДЭС}^{уд} = g_1^{уд} + \frac{(K_{з,ДЭС(t)} - K_{31})(g_2^{уд} - g_1^{уд})}{(K_{32} - K_{31})}, \quad (5)$$

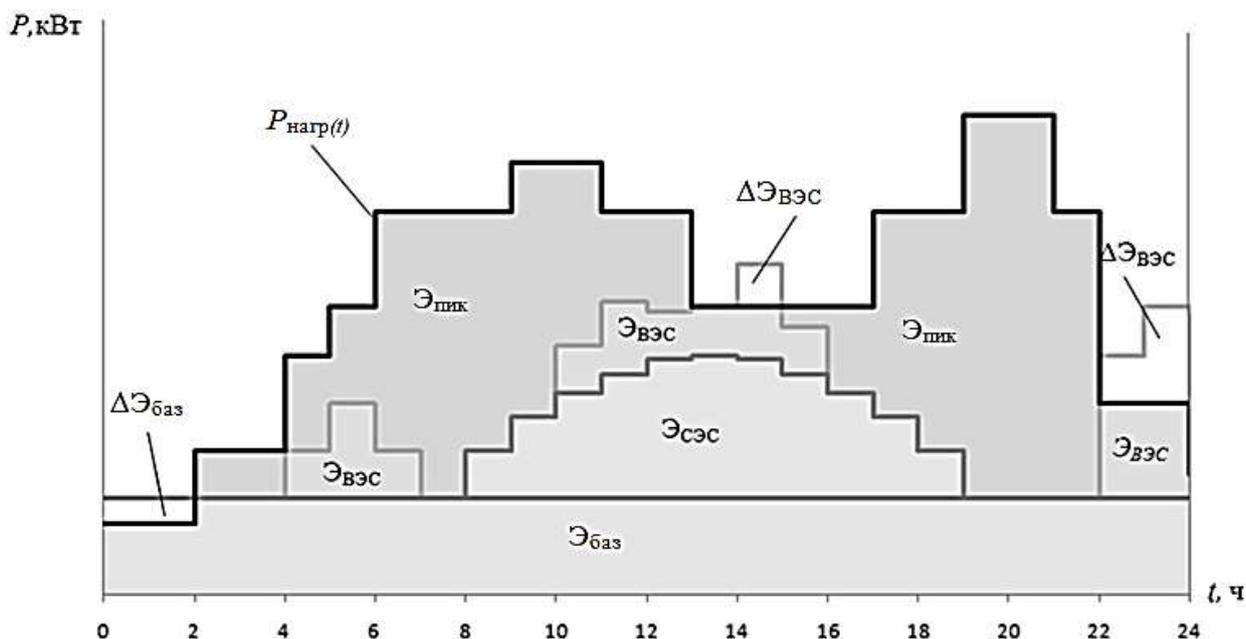


Рис. 3. Суточный график нагрузки и выработки энергии
 Fig. 3. Daily load and energy production schedule

где $g_1^{уд}$, $g_2^{уд}$ – нижняя и верхняя границы интервала значений удельного расхода топлива линейного участка характеристики, г/ч; K_{31} , K_{32} – нижняя и верхняя границы интервала значений коэффициентов загрузки линейного участка характеристики.

Шаг 4. Осуществляется оценка сформированных вариантов СГМ по критериям.

Критерий K_1 (см. рис. 2) характеризуется нормированной стоимостью электроэнергии (от англ. Levelized Cost of Energy, LCOE) при ее производстве электростанциями, входящими в СГМ [23, 24]:

$$LCOE = \frac{\sum_{q=1}^n (I_q + OM_q + F_q)(1+r)^{-q}}{\sum_{q=1}^n E_q (1+r)^{-q}}, \quad (6)$$

где I_q – инвестиции, осуществленные в году q , руб.; OM_q – затраты на эксплуатацию, амортизационные отчисления в год q , руб.; F_q – расходы на топливо в году q , руб.; E_q – производство электроэнергии в году q , кВт·ч; r – ставка дисконтирования; n – расчетный срок, 25 лет.

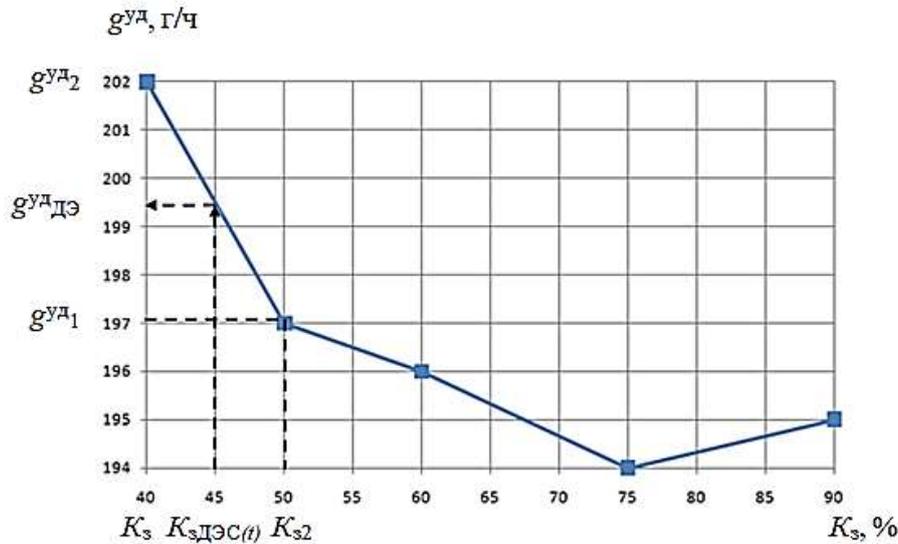


Рис. 4. Определение удельного расхода топлива дизель-генераторной установки
Fig. 4. Determination of the specific fuel consumption of a diesel-generator set

$$OM_q = \left[\sum_{q=1}^n (a_{ddk} + a_{rk}) \cdot I_{qk} + OM_q^{ДЭС} \right] (1 + \varepsilon_{oc})^{q-1}, \quad (7)$$

где a_{ddk} – норма амортизации для k электростанции, %; a_{rk} – ежегодные отчисления на обслуживание и ремонт для k электростанции, %; I_{qk} – капитальные вложения в k электростанцию, руб.; ε_{oc} – коэффициент увеличения издержек в q год;

Значение a_{ddk} для различных типов станций определяется как величина, обратная сроку эксплуатации. Величина a_r для СЭС принята на уровне 3%, для ВЭС и ТЭС – 5%.

Для ДЭС затраты на техническое обслуживание определяются:

$$OM_q^{ДЭС} = (a_{dd}^{ДЭС} \cdot I_q + \sum_{t=1}^{8760} n_{ДЭС(t)}^{факт} \cdot C_m) (1 + \varepsilon_{oc})^{q-1}, \quad (8)$$

где C_m – затраты на техническое обслуживание дизель-генераторной установки, руб/ч.

Расходы на топливо в году t определяются как

$$F_q = B \cdot k_e \cdot c_c \cdot (1 + \varepsilon_f)^{q-1}, \quad (9)$$

где B – годовой расход условного топлива на производство электроэнергии; k_e – calorific equivalent of natural fuel, o.e.; c_c – стоимость топлива с учетом доставки,

руб/т; ε_f – коэффициент увеличения стоимости топлива в q год.

При оценке вариантов СГМ по критерию K_2 (см. рис. 2) ввиду разнообразия воздействий на окружающую среду различных типов станций целесообразно рассматривать комплексные показатели, полученные на основе различных исследований, например [25].

Оценку СГМ по критерию K_3 (см. рис. 2) предлагается проводить при помощи субъективных моделей на основе опроса экспертов.

Результирующая оценка каждого варианта СГМ по критериям K_2 и K_3 определяется в зависимости от доли участия каждой станции в покрытии графика нагрузки:

$$A_j = \frac{\sum_{k=1}^z a_{jk} W_k}{\sum_{k=1}^z W_k}, \quad (10)$$

где A_j – оценка варианта СГМ по критерию j ; a_{jk} – оценка k электростанции по j критерию; W_k – годовая выработка электроэнергии k электростанцией, кВт·ч.

Шаг 5. Проводится многокритериальное сравнение альтернатив.

В качестве многокритериального метода в данной работе предлагается использовать

метод TOPSIS, который к настоящему времени получил широкое распространение при решении многих практических задач [26–28]. Данный метод отличается простотой, удобством в использовании для ЛПР, требует минимальное число запросов к ЛПР, производит количественную многокритериальную оценку альтернатив.

В основе метода TOPSIS лежит измерение сходства альтернативы с идеальным позитивным (ИПР) и негативным (ИНР) решением. Результаты ранжируются с учетом весов используемых критериев.

При многокритериальной оценке ЛПР не всегда может дать точный ответ относительно своих предпочтений. Например, в задачах с большим горизонтом планирования, участием нескольких заинтересованных сторон, наличием нескольких сценариев развития проблемы, ЛПР не всегда может определить и количественно выразить точной оценкой свои предпочтения. Поэтому в работе [29] предложена модификация метода, в которой введено использование нечетких функций ценности на этапе нормализации оценок. В данной модификации предпочтения ЛПР выражаются в виде нечетких однокритериальных функций ценности (НОФЦ) относительно оценок альтернатив по каждому критерию (рис. 5).

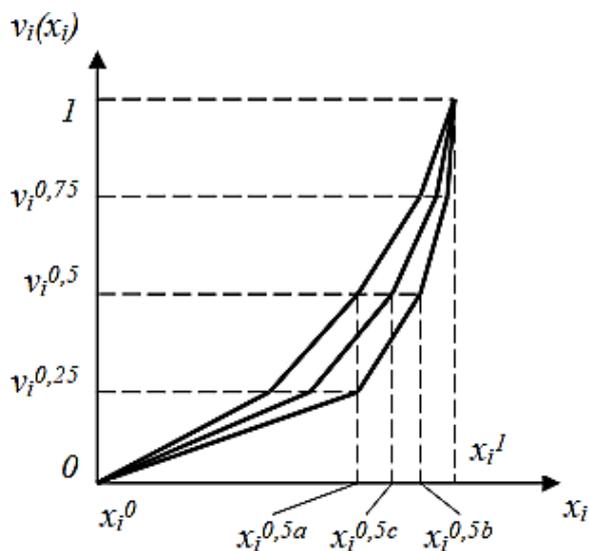


Рис. 5. Нечеткая однокритериальная функция ценности
 Fig. 5. Fuzzy single criterion value function

Построение НОФЦ ведется по пяти опорным точкам [30]. На интервале от $[x_i^0, x_i^1]$ определяется средняя по ценности точка $x_i^{0,5c}$, а также возможные граничные условия $x_i^{0,5a}$, $x_i^{0,5b}$ (см. рис. 5). ЛПР считает, что изменение оценки по критерию с x_i^0 до $x_i^{0,5c}$ равноценно изменению с $x_i^{0,5c}$ до x_i^1 , но допускает возможное изменение точки равной ценности от $x_i^{0,5a}$ до $x_i^{0,5b}$. Таким образом, от ЛПР будет получена нечеткая оценка $\tilde{v}_i^{0,5}(x_i^{0,5a}, x_i^{0,5c}, x_i^{0,5b})$. Оценки $x_i^{0,5a}$, $x_i^{0,5c}$, $x_i^{0,5b}$ имеют одинаковую ценность для ЛПР равную 0,5. Аналогичным образом устанавливаются средние по ценности точки на интервале $[x_i^0, x_i^{0,5c}]$ и $[x_i^{0,5c}, x_i^1]$ с ценностью $\tilde{v}_i^{0,25}$ и $\tilde{v}_i^{0,75}$, соответственно. Таким образом, НОФЦ позволяет в полной мере учесть индивидуальные особенности предпочтений ЛПР относительно оценок по критериям.

В результате при использовании нечетких функций ценности формируется взвешенная матрица нормированных нечетких значений:

$$\tilde{D} = \begin{pmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \dots & \tilde{r}_{1n} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \dots & \tilde{r}_{2n} \\ \dots & \dots & \tilde{r}_{ij} & \dots \\ \tilde{r}_{m1} & \tilde{r}_{m2} & \dots & \tilde{r}_{mn} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $\tilde{r}_{ij} = w_j[v_{ij}^a, v_{ij}^c, v_{ij}^b]$ – нормализованная оценка альтернативы i по критерию j ; n – количество критериев; w_j – вес j критерия, который назначается ЛПР и показывает важность критерия. Сумма всех весов критериев равна 1.

Далее определяется идеальное позитивное и негативное решение:

$$A^+ = (r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+), \quad r_j^+ = \max_i(\tilde{r}_{ij})$$

$$A^- = (r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-), \quad r_j^- = \min_i(\tilde{r}_{ij}). \quad (12)$$

Следующим этапом является определение расстояний альтернатив до ИПР и ИНР:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d_r(\tilde{r}_{ij}, r_j^+); \quad (13)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d_r(\tilde{r}_{ij}, r_j^-), \quad (14)$$

где d_r определяется как

$$d_r(\tilde{r}_{ij}, r_j^\pm) = \sqrt{\frac{1}{3}[(r_{ij}^a - r_j^\pm)^2 + (r_{ij}^c - r_j^\pm)^2 + (r_{ij}^b - r_j^\pm)^2]}, \quad (15)$$

где $r_{ij}^a, r_{ij}^c, r_{ij}^b$ – левая граница, ядро и правая граница нечеткой оценки альтернативы i по критерию j .

На заключительном этапе определяются интегральные показатели альтернатив:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}. \quad (16)$$

Альтернатива с наивысшим значением CC_i считается лучшим решением.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР СТРУКТУРЫ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ В УДАЛЕННОМ РАЙОНЕ

Применение методики многокритериального выбора СГМ рассматривается на примере Охотского района Хабаровского края.

Шаг 1. Формирование исходных данных о районе перспективного исследования. В ре-

зультате анализа карт полезных ископаемых² и схемы территориального планирования Хабаровского края было сделано заключение, что данный регион обладает перспективами развития рыбной промышленности и золоторудного производства. На основе анализа объектов аналогов были сформированы сезонные графики нагрузок района (рис. 6). Расчетная мощность перспективных потребителей составила 69 МВт.

Анализ ресурсов показал, что Охотский район характеризуется высокими гелиоэнергетическим и ветроэнергетическим потенциалами.

Для рассмотрения целесообразности включения в состав альтернатив строительства ГЭС был проведен анализ гидрологического потенциала р. Урак, как наиболее перспективной реки в данном регионе. Ее среднегодовой сток составляет 3,4 млн м³. При помощи топографических карт и программного комплекса Google Earth Pro были определены зоны и объемы затопления для различной высоты створа ГЭС с шагом 10 м [32]. Анализ гарантированной среднегодовой мощности в зависимости от высоты створа показал экономическую нецелесообразность строительства ГЭС. Например, при высоте створа 60 м гарантированная мощность составит 31 МВт, что существенно ниже, чем у объектов-аналогов.

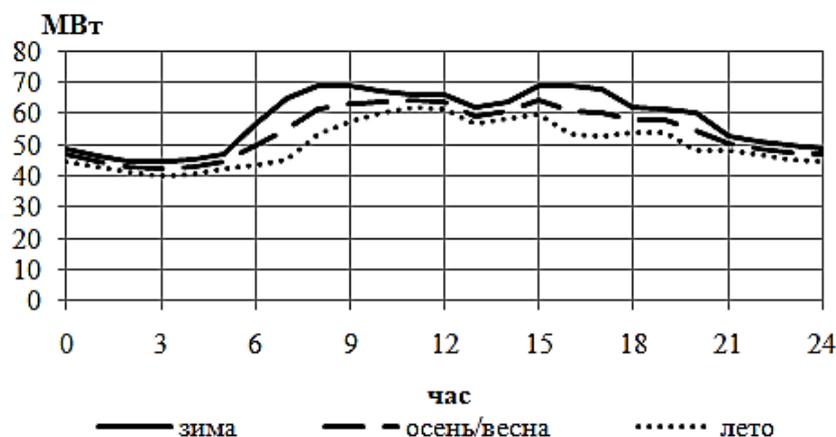


Рис. 6. Суточные графики нагрузки района
Fig. 6. Daily load schedules of a region

²Актуализированные ГИС-пакеты оперативной геологической информации (ГИС-Атлас «Недра России») [Электронный ресурс]. URL: [http://atlaspacket.vsegei.ru/#023f61f2999916b05_\(21.08.2020\)](http://atlaspacket.vsegei.ru/#023f61f2999916b05_(21.08.2020)).

В Охотском районе расположены два месторождения бурого угля – Мареканское и Кухтуйское. Мареканское бурогольное месторождение – единственное экономически рентабельное и легкодоступное для открытой добычи в Охотском районе, расположено в 21 км северо-восточнее п. Охотск, оно обладает благоприятными условиями для открытой разработки, например, для углей марки 2БВ, малозольных, с низким выходом смол, малосернистых. Запасы угля для открытого способа добычи подсчитаны в количестве 20,5 млн т по категориям В+С₁+С₂ и 34 – ресурсы по категории Р₁ [33].

Шаг 2. Формирование целей и критериев с учетом выбранных технологий производства электроэнергии. Для оценки альтернатив используется иерархия целей и критериев, приведенная на рис. 2.

Шаг 3. Формирование альтернативных вариантов СГМ. Для формирования альтернативных вариантов были выбраны следующие типы электростанций: в качестве базовой электростанции – ТЭС. В качестве электростанций на основе ВИЭ рассматриваются

СЭС и ВЭС. Для покрытия пиковой части графика – ДЭС. При анализе выработки электроэнергии данными типами электростанций на основании формул (1)–(4) были сформированы графики покрытия электрических нагрузок для характерных суток четырех сезонов. Например, на рис. 7 представлено покрытие графиков при варианте СГМ, включающем в себя: ТЭС – 30 МВт, СЭС – 30 МВт, ВЭС – 30 МВт, ДЭС – 39 МВт.

Шаг 4. Оценка вариантов СГМ по критериям. При оценке альтернатив по критерию K_1 на основе анализа объектов-аналогов были приняты следующие удельные капитальные вложения (табл. 1).

Перед анализом вариантов СГМ в ДЭС был предварительно проведен выбор единичной мощности дизель-генераторных установок. Рассматривались агрегаты мощностью в 500, 1000, 1500 и 2000 кВт. На рис. 8 представлены зависимости удельных капитальных затрат и удельного расхода топлива в зависимости от единичной мощности дизель-генераторных установок. Было установлено, что наиболее эффективной с точки

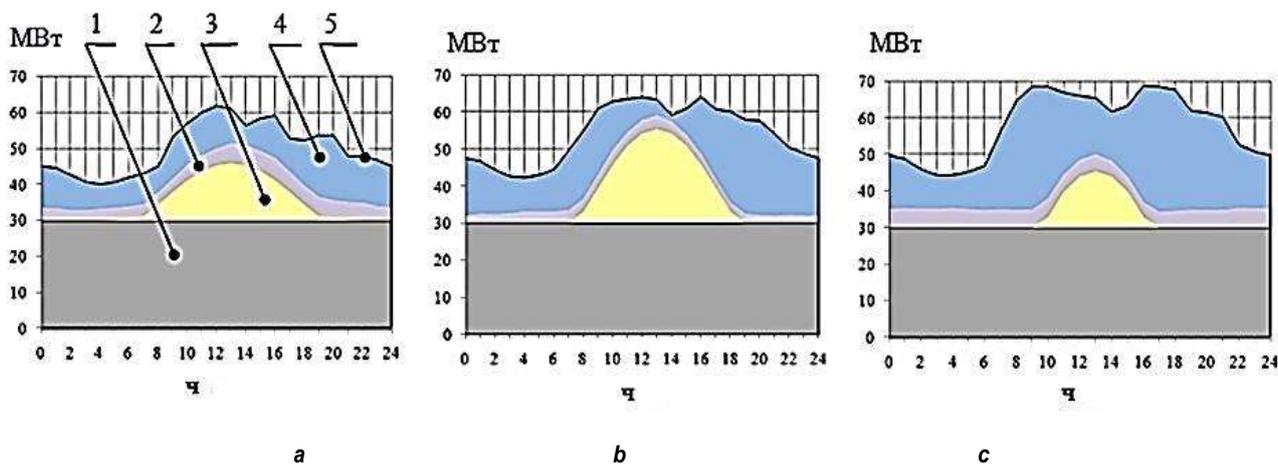


Рис. 7. Покрытие сезонных графиков нагрузки (5) района при варианте структуры генерирующих мощностей: тепловые электростанции (1) – 30 МВт, солнечные электростанции (2) – 30 МВт, ветроэлектростанции (3) – 30 МВт, дизельные электростанции (4) – 39 МВт; а – лето, б – весна/осень, с – зима

Fig. 7. Coverage of seasonal load curves (5) of the region with the generating capacity structure option: thermal power plants (1) – 30 MW, solar power plants (2) – 30 MW, wind power plants (3) – 30 MW, diesel power plants (4) – 39 MW; a – summer, b – spring/autumn; c – winter

Таблица 1. Удельные капитальные вложения и срок службы для различных типов электростанций
 Table 1. Specific capital investment and service life for various types of power plants

Тип станции	ТЭС	ВЭС	СЭС	ДЭС
Удельные капиталовложения $I_{уд}$, тыс. руб/кВт	70–105	100–120	90–110	8,7–11
Срок эксплуатации, лет	40	25	25	10



зрения капитальных затрат и расхода топлива является компоновка ДЭС агрегатами мощностью 2000 кВт. Цена на дизельное топливо принята 61187 руб/т. Цена на уголь с учетом доставки принята 3586 руб/т. Ставка дисконтирования при оценке LCOE по формуле (5) принята равной 7%.

Оценка альтернатив по критериям K_2 и K_3 проводилась при помощи формулы (10) по значениям из табл. 2 и 3 в зависимости от соотношения выработки электроэнергии различными типами электростанций.

В табл. 2 представлены оценки по комплексному показателю вредного воздействия, полученные на основе исследований экологических воздействий различных типов станций [26]. Большее значение соответствует более сильному воздействию на окружающую среду.

В табл. 3 представлена экспертная оценка отношения местного населения к различным типам станций, которая включает в себя эстетическое воздействие энергетического объекта, влияние на здоровье человека, возможное изменение традиционного образа и уровня жизни населения. Большее значение соответствует более благоприятному восприятию населением электростанции.

Таблица 2. Комплексный показатель вредного воздействия электростанций на окружающую среду и человека

Table 2. A comprehensive indicator of power plant harmful effects on people and environment

Тип станции	ТЭС	ГЭС	СЭС	ВЭС	ДЭС
Комплексный показатель вредного воздействия	65,2	16,5	22,1	18,9	26,4

Таблица 3. Экспертные оценки отношения местного населения к различным типам станций

Table 3. Expert assessments of local population attitude to various types of power stations

Тип электростанции	Оценка экспертов по «5-балльной шкале»
ТЭС	1
ВЭС	4
СЭС	5
ДЭС	2

В табл. 4 представлены отдельные наиболее перспективные варианты СГМ с оценками коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ) отдельных типов станций, а также оценками по критериям.

Шаг 5. Многокритериальная оценка альтернатив и выбор СГМ. На рис. 9 представлены функции ценности, которые применялись при многокритериальной оценке методом TOPSIS.

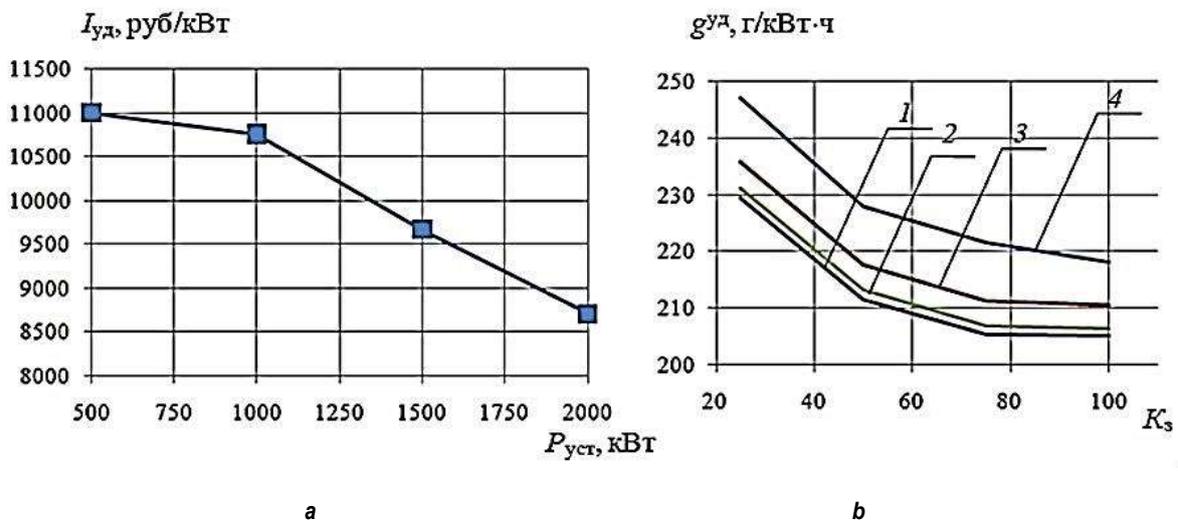


Рис. 8. Техничко-экономические характеристики дизель-генераторных установок: а – график удельных капитальных затрат дизель-генераторных установок; б – зависимость удельного расхода топлива от коэффициента загрузки агрегатов различной мощности

Fig. 8. Performance characteristics of diesel generators: а – schedule of specific capital costs of diesel generators; б – dependence of specific fuel consumption on the load factor of different capacity units
1–4 – установленная мощность дизельных генераторов 2000, 1500, 1000, 500 кВт
1–4 – installed capacity of diesel generators 2000, 1500, 1000, 500 kW

Таблица 4. Оценка вариантов структуры генерирующих мощностей по критериям
 Table 4. Evaluation of the structure options of generating capacities by criteria

А	Установленная мощность, МВт				КИУМ, %			K ₁ , руб/кВт·ч		K ₂ , балл	K ₃ , балл
	ТЭС	СЭС	ВЭС	ДЭС	ДЭС	СЭС	ВЭС	min	max		
								1	40		
2	30	35	0	39	47	17	–	7,61	7,89	45,81	1,78
3	30	0	70	39	39	–	18	8,36	8,76	50,32	1,34
4	30	30	30	39	39	17	18	7,79	8,15	47,40	1,71
5	20	45	0	49	55	17	–	9,60	9,86	39,05	2,06
6	20	0	70	49	52	–	18	10,49	10,83	42,35	1,56
7	20	30	30	49	52	17	18	9,92	10,23	40,25	1,91
8	10	60	0	59	58	17	–	11,51	11,77	32,22	2,38
9	10	0	70	59	60	–	18	12,61	12,90	34,37	1,78
10	10	30	30	59	60	17	18	12,04	12,30	33,11	2,11

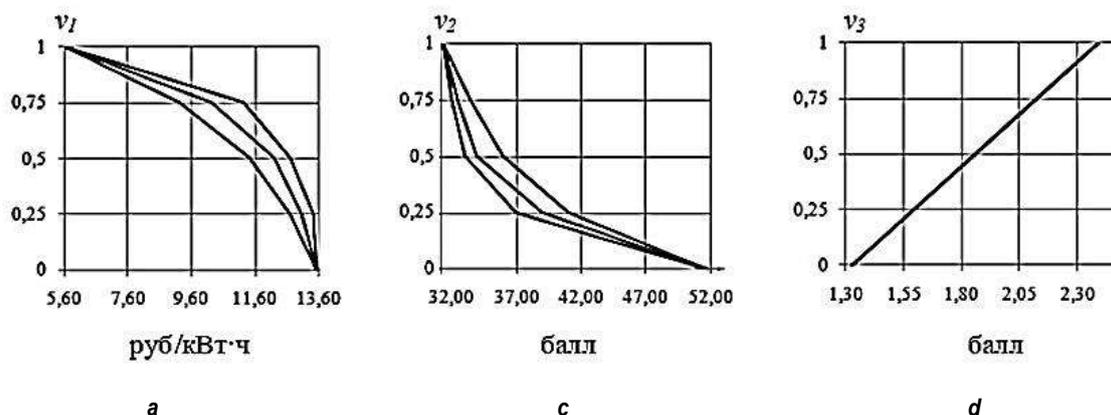


Рис. 9. Нечеткие однокритериальные функции ценности: а – K₁ – оценка экономической эффективности; б – K₂ – оценка экологического воздействия; с – K₃ – оценка общественного мнения
 Fig. 9. Fuzzy single criterion value functions: a – K₁ – assessment of economic efficiency; b – K₂ – assessment of environmental impact; c – K₃ – assessment of public opinion

В табл. 5 представлены результаты многокритериальной оценки вариантов СГМ методом TOPSIS при различных комбинациях значений весовых коэффициентов критери-

ев. Варьирование коэффициентов осуществлялось следующим образом: задавались значения K₁ в интервале от 0 до 1, а значения весов K₂ и K₃ принимались равными.

Таблица 5. Результаты многокритериального сравнения вариантов структуры генерирующих мощностей
 Table 5. Results of multi-criteria comparison of generating capacity structure options

Веса критериев			Лучшие альтернативы по результатам многокритериального анализа	
K ₁	K ₂	K ₃	K ₁ ^{min}	K ₁ ^{max}
0	0,5	0,5	A8	A8
0,1	0,45	0,45	A8	A8
0,2	0,4	0,4	A8	A8
0,3	0,35	0,35	A8	A8
0,4	0,3	0,3	A8	A8
0,45	0,275	0,275	A1	A8
0,5	0,25	0,25	A1	A8
0,6	0,2	0,2	A1	A1
0,7	0,15	0,15	A1	A1
0,8	0,1	0,1	A1	A1
0,9	0,05	0,05	A1	A1
1	0	0	A1	A1



Исходя из оценок вариантов СГМ (см. табл. 4, 5), можно сделать следующие выводы. При большом весе критерия экономической эффективности, $K_1 > 0,5$, лучшей альтернативой будет являться А1 (ТЭС 40 МВт, СЭС 20 МВт, ДЭС 29 МВт). Данная альтернатива характеризуется низким LCOE, однако имеет плохие показатели относительно влияния на окружающую среду и социальной оценки. Это сказывается на оценке альтернативы, когда вес критерия $K_1 < 0,5$. Тогда лучшей альтернативой становится А8 (ТЭС 10 МВт, СЭС 60 МВт, ДЭС 59 МВт). Эта альтернатива имеет практически наилучшие показатели по критериям K_2 и K_3 ввиду наличия значительной мощности СЭС, которая имеет оценку «5» по показателям социального оценивания различных технологий выработки электроэнергии и практически минимальное экологическое воздействие.

Из анализа табл. 4, 5 можно сделать вывод, что неопределенность предпочтений ЛПР, выраженная с помощью нечетких функций ценности, не сказалась на ранжировании альтернатив. Это объясняется сравнительно узкими границами нечетких оценок при построении функций ценности.

Неопределенность исходной информации, выраженная через интервальные значения капитальных затрат, выразилась в неоднозначности выбора лучшей альтернативы при весах критериев 0,45; 0,275; 0,275.

В целом проведенный анализ позволяет выделить группу наиболее перспективных альтернатив для их более детального исследова-

ования после сбора дополнительной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Для выбора СГМ локальных энергосистем необходимо дальнейшее совершенствование методического и программного обеспечения в направлении учета множественности критериев, неопределенности исходной информации и сценариев развития.

2. Предложена методика многокритериального выбора СГМ, которая позволяет формировать альтернативные варианты установленной мощности электростанций, получать оценки по критериям и проводить многокритериальное сравнение альтернатив с учетом фактора неопределенности.

3. В качестве метода многокритериальной оценки предложен и рассмотрен модифицированный метод TOPSIS, использующий нечеткие функции ценности для учета неопределенности предпочтений ЛПР в связи с множественностью сценариев развития района.

4. Проведена апробация предложенной методики при выборе СГМ в удаленном районе Хабаровского края. В зависимости от коэффициентов важности критериев методика позволяет формировать соответствующие структуры генерирующих мощностей. Выделены перспективные варианты СГМ для более детального дальнейшего исследования.

Список литературы

1. Санеев Б.Г., Беляев Л.С., Агафонов Г.В., Воробьева В.В., Головин А.П., Иванова И.Ю. [и др.]. Восточный вектор энергетической стратегии России: современное состояние, взгляд в будущее / под ред. Н.И. Воропая, Б.Г. Санеева. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2011. 368 с.
2. Ivanova I. Significant factors affecting the selection of rational options for power supply in an off-grid zone // Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web Conference. 2019. Vol. 77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197702006>
3. Kiushkina V., Lukutin V. Energy security of northern and arctic isolated territories // Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web Conference. 2019. Vol. 77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701008>
4. Воропай Н.И., Подковальников С.В., Труфанов В.В. [и др.]. Обоснование развития электроэнергетических систем: методология, модели, методы, их использование / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2015. 448 с.
5. Шакиров В.А., Фадеев В.А. Оценка риска невооруженности мощности электростанций в удаленных районах // Проблемы анализа риска. 2015. Т. 12. № 2. С. 78–85.
6. Нефедов А.С., Шакиров В.А., Яковкина Т.Н. Многокритериальный двухэтапный выбор структуры генерирующих мощностей в удаленных районах // Промышленная энергетика. 2019. № 6. С. 14–24.
7. Воропай Н.И., Подковальников С.В., Труфанов В.В. Методические основы обоснования развития электро-

- энергетических систем в либерализованных условиях // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2002. № 4. С. 30–39.
8. Сибгатуллин А.Р., Елистратов В.В. Оптимизация состава оборудования на основе возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения автономных потребителей небольшой мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 23-24. С. 51–67. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.23-24.051-067>
9. Елистратов В.В., Виноградова (Чернова) А.В. Моделирование режимов работы энергетического комплекса ВЭС-ГЭС в децентрализованной системе энергоснабжения // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 9-10. С. 12–24. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.09-10.012-024>
10. Клер А.М., Жарков П.В., Сушко С.Н. Особенности оптимизации состава оборудования и режимов работы локальных систем энергоснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 10. С. 188–193.
11. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 9. С. 133–140.
12. Обухов С.Г., Ибрагим А. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 64–76. <https://doi.org/10.14529/power200206>
13. Lukutin B.V., Shandarova E.B., Matukhin D.L., Igsenov A.A., Shandarov S.M. Simulation and optimization of wind and diesel power supply systems // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 177. P. 012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012090>
14. Kefayat M., Lashkar Ara A., Nabavi Niaki S.A. A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources // Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 92. P. 149–161. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.037>
15. Damodaran S.K., Sunil Kumar T.K. Hydro-thermal-wind generation scheduling considering economic and environmental factors using heuristic algorithms // Energies. 2018. Vol. 11. No. 2. <http://doi.org/10.3390/en11020353>
16. Mishra S., Panigrahi C.K., Kothari D.P. Design and simulation of a solar-wind-biogas hybrid system architecture using HOMER in India // International Journal of Ambient Energy. 2016. Vol. 37. Issue 2. P. 184–191. <http://doi.org/10.1080/01430750.2014.915886>
17. Ahmed N.M., Farghally H.M., Fahmy F.H. Optimal sizing and economical analysis of PV-Wind hybrid power system for water irrigation using genetic algorithm // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2017. Vol. 7. No. 4. P. 1797–1814. <http://doi.org/10.11591/ijece.v7i4.pp1797-1814>
18. Kaur D., Cheema P.S. Software tools for analyzing the hybrid renewable energy sources: – a review // International Conference on Inventive Systems and Control. 2017. <http://doi.org/10.1109/ICISC.2017.8068591>
19. Осика Л.К. Управление инвестпроектами строительства ТЭС. Предынвестиционная фаза. М.: Вершина, 2008. 344 с.
20. Цыкунов Г.А. Советские гидроэнергетические проекты в Сибири и современность // Иркутский историко-экономический ежегодник: сб. ст. Иркутск, 2019. С. 52–60. <http://doi.org/10.17150/978-5-7253-3001-4.07>
21. Мельникова Н.В., Артемов Е.Т., Бедель А.Э., Волошин Н.П., Михеев М.В. История взаимодействия ядерной энергии и общества в России. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 127 с.
22. Нефедов А.С., Шакиров В.А. Многокритериальный выбор технологий производства электрической энергии при развитии локальной системы электроснабжения // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1. С. 60–67. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-1-60-67>
23. Wei Shen, Xi Chen, Jing Qiu, Hayward J.A., Sayeef Saad, Osman Peter, et al. A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 133. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110301>
24. Hansen K. Decision-making based on energy costs: comparing levelized cost of energy and energy system costs // Energy Strategy Reviews. 2019. Vol. 24. P. 68–82. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.02.003>
25. Грачев В.А., Плямина О.В. Глобальные экологические проблемы, экологическая безопасность и экологическая эффективность энергетики // Век глобализации. 2017. Вып. 1. С. 86–97.
26. Hwang Ching-Lai, Yoon Kwangsun. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981. 273 p.
27. Karunathilake H., Hewage K.N., Sadiq R. Renewable energy technology selection for community energy systems: A case study for British Columbia // Energy System Planning for Net-Zero Communities: CSCE Annual General Conference At: Vancouver, BC, Canada. 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/326211412_Renewable_energy_technology_selection_for_community_energy_systems_A_case_study_for_British_Columbia (15.08.2020).
28. Karatas M., Sulukan E., Karacan I. Assessment of Turkey's energy management performance via a hybrid multi-criteria decision-making methodology // Energy. 2018. Vol. 153. P. 890–912. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.051>
29. Нефедов А.С., Шакиров В.А. Многокритериальная оценка альтернатив на основе метода TOPSIS в условиях неопределенности предпочтений лица, принимающего решения // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2019. № 3. С. 25–32.
30. Шакиров В.А. Многокритериальная оценка альтернатив на основе теории полезности в условиях неопределенности предпочтений лица, принимающего решения // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2018. Т. 13. № 1. С. 17–35. <https://doi.org/10.26456/fssc37>



31. Неведов А.С., Панкратьев П.С. Выбор оптимальной высоты створа гидроэлектростанции при организации электроснабжения удаленных районов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 2. С. 111–115.

32. Угольная база России. Т. V. Кн. 2. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России (Республика Саха, Северо-Восток, о. Сахалин, п-ов Камчатка) / под ред. В.Ф. Череповского. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. 638 с.

References

1. Saneev BG, Belyaev LS, Agafonov GV, Ivanova IYu, Izhbuldin AK, Keiko A.V., et al. *The eastern vector of Russia's energy strategy: state of the art and projects* / ed. NI Voropaj, BG Saneev. Novosibirsk: Geo; 2011, 368 p. (In Russ.)
2. Ivanova I. Significant factors affecting the selection of rational options for power supply in an off-grid zone. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web Conference*. 2019;77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197702006>
3. Kiushkina V, Lukutin B. Energy security of northern and arctic isolated territories. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web Conference*. 2019;77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701008>
4. Voropaj NI, Podkoval'nikov SV, Trufanov VV, et al. Rationale for the development of electric power systems: methodology, models, methods, their use / ed. NI Voropaj. Novosibirsk: Nauka; 2015, 448 p. (In Russ.)
5. Shakirov VA, Fadeev VA. Assessing the risk of lack of demand for power plants in remote areas. *Problemy analiza riska = Issues of Risk Analysis*. 2015;12(2):78–85. (In Russ.)
6. Nefedov AS, Shakirov VA, Yakovkina TN. Multi-criteria two-stage selection of the structure of generating capacity in remote areas. *Promyshlennaya energetika*. 2019;6:14–24. (In Russ.)
7. Voropaj NI, Podkoval'nikov SV, Trufanov VV. Methodology of substantiation of electric power system development in liberalized conditions. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2002;4:30–39. (In Russ.)
8. Sibgatullin AR, Elistratov VV. Optimization of equipment composition based on renewable energy sources in electric supply systems for low power autonomous consumers. *Alternativnaâ energetika i èkologiâ = Alternative Energy and Ecology*. 2016;23-24:51–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.23-24.051-067>
9. Elistratov VV, Vinogradova (Chernova) AV. Simulation of WPP/HPP power system operating modes in decentralized power supply system. *Alternativnaâ energetika i èkologiâ = Alternative Energy and Ecology*. 2016;9-10:12–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.09-10.012-024>
10. Kler AM, Zharkov PV, Sushko SN. Optimization features of local power supply system equipment and operation modes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;10:188–193. (In Russ.)
11. Karamov DN. Mathematical modeling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;9:133–140. (In Russ.)
12. Obukhov SG, Ibrahim A. Optimization of equipment composition of hybrid energy systems with renewable energy sources. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2020;20(2):63–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power200206>
13. Lukutin BV, Shandarova EB, Matukhin DL, Igisenov AA, Shandarov SM. Simulation and optimization of wind and diesel power supply systems. In: *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;177:012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012090>
14. Kefayat M, Lashkar Ara A, Nabavi Niaki SA. A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources. *Energy Conversion and Management*. 2015;92:149–161. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.037>
15. Damodaran SK, Sunil Kumar TK. Hydro-thermal-wind generation scheduling considering economic and environmental factors using heuristic algorithms. *Energies*. 2018;11(2). <http://doi.org/10.3390/en11020353>
16. Mishra S, Panigrahi CK, Kothari DP. Design and simulation of a solar-wind-biogas hybrid system architecture using HOMER in India. *International Journal of Ambient Energy*. 2016;37(2):184–191. <http://doi.org/10.1080/01430750.2014.915886>
17. Ahmed NM, Farghally HM, Fahmy FH. Optimal sizing and economical analysis of PV-Wind hybrid power system for water irrigation using genetic algorithm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017;7(4):1797–1814. <http://doi.org/10.11591/ijece.v7i4.pp1797-1814>
18. Kaur D, Cheema PS. Software tools for analyzing the hybrid renewable energy sources: - a review. In: *International Conference on Inventive Systems and Control*. 2017. <http://doi.org/10.1109/ICISC.2017.8068591>
19. Osika LK. *Management of investment projects of thermal power plant construction. The pre-investment phase*. Moscow: Vershina; 2009, 344 p. (In Russ.)
20. Tsykunov GA. Soviet hydropower projects in Siberia and the present. In: *Irkutskii istoriko-ekonomicheskii ezhegodnik = Irkutsk Historical and Economic Annual Book*. 2019, p. 52–60. (In Russ.)
21. Melnikova NV, Artemov ET, Bedel AE, Voloshin NP, Mikheev MV. *The history of interaction between nuclear energy and society in Russia*. Ekaterinburg: Institute of History and Archaeology; 2018, 127 p. (In Russ.)
22. Nefedov AS, Shakirov VA. Multi-criteria selection of technologies for the production of electrical energy in the development of a local power supply system. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2019;1:60–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-1-60-67>

24. Wei Shen, Xi Chen, Jing Qiu, Hayward JA, Sayeef Saad, Osman Peter, et al. A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;133. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110301>

25. Hansen K. Decision-making based on energy costs: comparing levelized cost of energy and energy system costs. *Energy Strategy Reviews*. 2019;24:68–82. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.02.003>

26. Grachev VA, Plyamina OV. Global ecological problems, environmental safety and environmental efficiency of the energy sector. *Vek globalizatsii*. 2017;1:86–97. (In Russ.)

27. Hwang Ching-Lai, Yoon Kwangsun. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1981, 273 p.

28. Karunathilake H, Hewage KN, Sadiq R. Renewable energy technology selection for community energy systems: A case study for British Columbia. *Energy System Planning for Net-Zero Communities: CSCE Annual General Conference At: Vancouver, BC, Canada. 2017*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/326211412_Renewable_energy_technology_selection_for_community_energy_systems_A_case_study_for_British_Columbia [Ac-

cessed 15th August 2020].

29. Karatas M, Sulukan E, Karacan I. Assessment of Turkey's energy management performance via a hybrid multi-criteria decision-making methodology. *Energy*. 2018;153:890–912. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.051>

30. Nefedov AS, Shakirov VA. Multi-criteria assessment of alternatives based on the TOPSIS method in the conditions of uncertainty of the preferences of the decision maker. *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya*. 2019;3:25–32. (In Russ.)

31. Shakirov VA. Multi-criteria evaluation of alternatives under conditions of uncertainty in the decision maker's preferences based on utility theory. *Nechetkie sistemy i myagkie vychisleniya = Fuzzy systems and soft computing*. 2018;13(1):17–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.26456/fssc37>

32. Nefedov AS, Pankrat'ev PS. Choosing the optimal height of the hydroelectric station site when organizing power supply of remote areas. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2019;2:111–115. (In Russ.)

33. *Coal base of Russia*. Vol. V. Book. 2. *Coal basins and deposits of the Russian Far East (Republic of Sakha, North-East, Sakhalin Island, Kamchatka Peninsula)* / ed. VF Cherepovskoj. Moscow: Geoinformmark; 1999, 638 p. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Нефедов Александр Сергеевич,
старший преподаватель,
кафедра промышленной теплоэнергетики,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия;
✉ e-mail: domino1991@rambler.ru

Яковкина Татьяна Николаевна,
кандидат технических наук,
декан факультета энергетики и автоматики,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия;
e-mail: jatano@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.10.2020; одобрена после рецензирования 25.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Nefedov,
Senior Lecturer,
Department of Industrial Heat and Power Engineering,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia;
✉ e-mail: domino1991@rambler.ru

Tatiana N. Yakovkina,
Cand. Sci. (Eng.),
Dean of the Faculty of Power Engineering
and Automation,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia;
e-mail: jatano@yandex.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 26.10.2020; approved after reviewing 25.11.2020; accepted for publication 18.12.2020.



Перспективы использования энергетических углей Иркутской области

© Л.Н. Такайшвили, Г.В. Агафонов

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

Резюме: Цель – оценка направлений и перспектив использования энергетических углей Иркутской области для нужд электро- и теплоэнергетики с учетом возможного экспорта электроэнергии в страны Юго-Восточной Азии, а также в качестве сырья для нужд углехимии. Исследования проведены с применением методов системного анализа: анализ и синтез, формализация и конкретизация, структурирование и реструктурирование, классификация. При анализе балансовых запасов энергетических углей впервые выделена категория местных, особенностью которых являются их низкокачественные характеристики и удаленность от населенных пунктов и транспортных коммуникаций, также дана их ресурсная оценка – 0,54 млрд т. Получена оценка извлекаемых запасов местных углей – 260 млн т и рассчитан потенциально возможный уровень добычи местных углей. Рассмотрены тенденции потребления энергетических углей области в ретроспективе и возможные направления использования в перспективе. Показано, что наиболее востребованным направлением является использование углей для нужд энергетики, в основном на теплоэлектростанциях. Показаны расчетные объемы потребления углей двух экспортных теплоэлектростанций – Мугунской и Ишидейской, соответственно – 11 и 6 млн т. По расчетам авторов, доля выработки электроэнергии на угольных теплоэлектростанциях в зависимости от реализации варианта ее экспорта может возрасти по сравнению с уровнем 2019 г. в 1,5–2,1 раза. Наличие значительных запасов энергетических углей области позволяет рассматривать их как надежный источник энергоресурсов для электро- и теплоэнергетики, в том числе для экспорта электроэнергии, и как перспективное сырье для нужд углехимии. Потенциальные возможности добычи углей оцениваются в 50–60 млн т в год, в том числе местных – 6,5 млн т. Возможности добычи значительно превышают их востребованность как в настоящее время, так на перспективу.

Ключевые слова: энергетический уголь, балансовые запасы, восточные регионы России, потребление, добыча, проекты

Благодарности: Исследование выполнено в рамках научных проектов: XI.174.2. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310435-0, и проекта III.17.6.1 государственного задания, рег. № АААА-А17-117030310445-9.

Для цитирования: Такайшвили Л.Н., Агафонов Г.В. Перспективы использования энергетических углей Иркутской области. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1271–1284. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1271-1284>

Application prospects of Irkutsk region thermal coals

Lyudmila N. Takaishvili, Gleb V. Agafonov

Melentiev Energy System Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to assess application directions and prospects of Irkutsk region power generating coals for the needs of electric and heat power engineering with regard to the possible export of electrical energy to the countries of South-East Asia, and use as raw materials for coal chemistry needs. The research is carried out using the methods of system analysis involving analysis and synthesis, formalization and concretization, structuring and restructuring, classification. It is the first time when the category of local power generating coals is distinguished under the analysis of the balance reserves of thermal coals. Their feature is low-quality and remoteness from settlements and transportation lanes. Their resource estimate is also given – 0.54 billion tons. An estimate of the recoverable reserves of local coals is obtained: it is 260 million tons. The potential level of local coal production is calculated. A retrospect of consumption trends of regional thermal coals is given and possible application directions are considered in the long run. It is shown that the most demanded direction is the use of coals for energy needs, mainly at thermal power plants. The calculated volumes of coal consumption of two export TPPs, Mugunskaya and Ishideiskaya, are respectively 11 and 6 million tons. According to the authors' calculations, the percentage of electrical energy generation at coal-fired TPPs depending on its export variant implementation can increase by 1.5 – 2.1 times as compared with the level of 2019. Availability of signifi-

cant reserves of power generating coals in the region makes them a reliable source of energy resources for the electric and thermal power industry, including the export of electrical energy and a promising raw material for the needs of coal chemistry. Potential capacity of coal mining is estimated at 50-60 million tons per year, including 6.5 million tons of local coals. Production potential of coal significantly exceeds its demand both at present and in the future.

Keywords: power generating (thermal) coal, balance reserves, Eastern regions of Russia, consumption, coal production, projects

Acknowledgements: The research has been carried out within the frameworks of the scientific projects XI.174.2., the program of fundamental research SB RAS, reg. no. AAAA-A17-117030310435-0 and the project III.17.6.1 of the state assignment, reg. no. AAAA-A17-117030310445-9.

For citation: Takaishvili LN, Agafonov GV. Application prospects of Irkutsk region energy coals. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6): 1271–1284. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1271-1284>

ВВЕДЕНИЕ

Иркутская область располагает значительными запасами энергоресурсов: гидро-ресурсы, уголь, нефть и природный газ. В настоящее время основными ресурсами для выработки электроэнергии в области являются гидроресурсы и уголь. Угольные электростанции всегда играли важную роль в энергосистеме Восточной Сибири и Иркутской области в частности. Иркутская энергосистема является одной из крупнейших энергосистем России¹. Доля Иркутской области от объемов выработки электроэнергии в России составляет 6,2%, при доле численности населения области 1,68%. Уголь является основным видом топлива, потребляемым на электростанциях Иркутской области. Угледобывающие предприятия являются градообразующими в регионах добычи угля.

Проектом Программы Развития угольной промышленности России на период до 2035 г. основное развитие угледобычи планируется за счет восточных регионов России², в результате к 2035 г. доля восточных регионов в прогнозируемых объемах добычи угля увеличится с 35% до 45–49% [1]. При этом на территории Сибири и Дальнего Востока предусмотрена реализация целого ряда проектов, предполагающих строительство 7 но-

вых угольных ТЭС и модернизацию 12 действующих². В предыдущей редакции программы³, принятой в июне 2014, рассматривалось сооружение новых крупных угольных электростанций в Иркутской области, предназначенных не только для удовлетворения внутренней потребности, но и для экспорта электроэнергии. В настоящее время проекты сооружения в области таких угольных электростанций рассматриваются как потенциально возможные как к 2035 году, но и в более отдаленной перспективе.

Согласно средне- и долгосрочным прогнозам, в перспективе сохранится как динамика роста мирового потребления угля, так и общая международная торговля углем, причем рост торговли связан в первую очередь с растущим (4–5% в год) рынком стран Азиатско-Тихоокеанского региона [1]. Это подтверждается и прогнозами, составленными «BP Energy Outlook – 2019 edition»⁴ и «EnerOutlook 2050»⁵: спрос на первичные энергоресурсы и на электроэнергию в странах Юго-Восточной Азии в перспективе возрастет [2, 3], что создаст благоприятные условия для строительства в Иркутской области электростанций, ориентированных на экспорт электроэнергии в эти страны, и в первую очередь, в Китай.

¹Схема и программа развития электроэнергетики Иркутской области на 2021–2025 гг. Утв. указом № 124-уг Губернатора Иркутской области от 29.04.2020.

²Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 г. Утв. распоряж. № 1582-р Правительства Российской Федерации от 13.06.2020.

³Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. Утв. распоряжением № 1099-р Правительства Российской Федерации от 21.06.2014.

⁴BP Energy Outlook – 2019 edition [Электронный ресурс]. URL: <https://nangs.org/analytics/bp-bp-energy-outlook-pdf.xlsx-pptx> (19.08.2020).

⁵EnerOutlook 2050 [Электронный ресурс]. URL: <https://eneroutlook.enerdata.net/> (21.08.2020).



ЗАПАСЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ

В пределах Иркутской области находятся три основных угольных бассейна – Иркутский, Канско-Ачинский и Тунгусский [4]. На территории этих бассейнов выделяется свыше двух десятков крупных угольных месторождений, а, кроме того, на северо-востоке области находится еще ряд более мелких месторождений угля в районе Предбайкальского геологического прогиба. По состоянию на 01.01.2019 г. всего на территории области располагается 24,7 млрд т прогнозных ресурсов угля и 14,7 млрд т разведанных запасов по категориям А+В+С₁+С₂, а также 10 млрд т забалансовых запасов, которые со временем могут быть переведены в балансовые [5] (табл. 1). Разрабатывается и подготовлено к освоению 3,36 млрд т – 40,7%. Доля энергетических углей в балансовых запасах составляет около 90%.

Таблица 1. Запасы Иркутской области по видам угля и способу отработки, млрд т

Table 1. Irkutsk region reserves by coal types and mining methods, billion tons

Вид угля, способ отработки	Категория запасов		
	А+В+С ₁	С ₂	А+В+С ₁ +С ₂
Всего, в т.ч.	8,06	6,63	14,69
коксуемый	0,75	0,56	1,31
энергетический, их них:	7,31	6,07	13,38
бурый	2,19	0,78	2,97
каменный	5,12	5,29	10,41
Для открытой разработки, всего, в т.ч.	7,7	4,54	12,24
энергетический	7,03	0	7,03

От объемов балансовых запасов категорий А+В+С₁ для отработки наиболее эффективным открытым способом пригодно 95,5%. Основные запасы угля сосредоточены на трех месторождениях Иркутского бассейна: Каранцайском, Мугунском и Ишидейском. Месторождения расположены на территории густонаселенной южной части области с развитой транспортной инфраструктурой, что важно для создания крупных объектов энергетики. Условия залегания угольных пластов являются благоприятными для отработки открытым способом.

Обеспеченность запасами энергетических углей в Иркутской области при современном уровне добычи составляет около 700 лет, что позволяет рассматривать уголь как надежный источник топлива для энергетики.

Качество углей месторождений крайне неоднородно, даже в пределах одного бассейна. Таким образом, из более десятка месторождений Иркутского бассейна на большей части из них среднее содержание серы колеблется от 0,4% до 2,0%, в то время как на Мугунском, Каранцайском и Новометелкинском месторождениях угли характеризуются высоким содержанием органической серы – до 5,7% [6]. Характерным примером территориальной неоднородности содержания серы в угольных пластах является одно из месторождений бурых углей Предбайкальского прогиба – Хандинское, где угли в восточной его части малосернистые, а в западной – сернистые и высокосернистые.

Практически на каждом месторождении есть доля углей, которые можно отнести к низкокачественным [5–6]. В первую очередь это бурые угли, которые, зачастую малотранспортабельны, а среди каменных – низкосортные тощие и окисленные.

Ресурсы низкокачественных энергетических углей нераспределенного фонда для Иркутской области составляют 2,2 млрд т, или 15% от разведанных (табл. 2).

Таблица 2. Запасы Иркутской области низкокачественных и местных углей по видам, млрд т

Table 2. Irkutsk region reserves of low-quality and local coals by types, billion tons

Вид и категория угля	Категория запасов		
	А+В+С ₁	С ₂	А+В+С ₁ +С ₂
Бурый низкокачественный	1,53	0,56	2,09
Местные из бурого	0,13	0,31	0,44
Каменный низкокачественный	0,03	0,08	0,11
Местные из каменного	0,02	0,08	0,10
Всего низкокачественных	1,56	0,64	2,20
Всего местных	0,15	0,39	0,54

Основная их часть приходится на бурые и лишь незначительная на каменные – 5%. Из этих месторождений был выделен ряд таких, которые из-за крайней удаленности от по-

тенциальных потребителей и отсутствия транспортной инфраструктуры наиболее целесообразно использовать на месте добычи. С учетом этих двух признаков далее такие угли обозначим как «местные» (см. табл. 2).

Наиболее крупными из местных бурогольных месторождений являются два месторождения Предбайкальского прогиба – Хандинское в Казачинско-Ленском районе и Тулонское в Качугском районе. Предварительная оценка геологических запасов каждого превышает 500 млн т [6]. В районе Предбайкальского прогиба есть еще несколько менее крупных бурогольных месторождений – Мостовское, Корсаковское, Булузинское, Харанурское и Лапхайское с оцененными запасами и прогнозными ресурсами каждого в пределах 12–82 млн т. На западе Иркутской области в Тайшетском районе есть несколько угольных месторождений Канско-Ачинского бассейна – Конторское, Шиткинское и Урало-Ключевское, которые также могут быть отнесены к местным [6].

Из месторождений каменных углей к местным относятся отдельные участки углей марок «тощие» и «окисленные» Жеронского месторождения Тунгусского бассейна (Веринский, Жеронский, Зелендинский). К ним также отнесены имеющиеся там угли марок, используемых в энергетике – Т, А и Д, Т [6]. Суммарная величина балансовых запасов этих углей, пригодных для добычи открытым способом, составляет 101 млн т.

Геологические особенности залегания угольных пластов местных углей и неоднородность их качества для большинства месторождений могут потребовать применения технологий, связанных с селективной обработкой, что приведет, соответственно, к удорожанию добычи. Суммарные балансовые запасы всех местных углей составляют 0,54 млрд т, или 24% от суммарных балансовых запасов низкокачественных углей (см. табл. 2). В настоящее время большая часть этих запасов являются слабоизученными и, соответственно, невостребованными. В перспективе с развитием экономики и энергетики области значительная их часть может быть вовлечена в использование.

РЕСУРСНАЯ БАЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ДОБЫЧИ МЕСТНЫХ УГЛЕЙ

Наличие значительных запасов энергетических углей в области позволяет рассматривать их как надежный энергетический ресурс на длительную перспективу не только для развития угольной энергетики, но также и для использования в качестве сырья, отвечающего требованиям углехимии [7]. Наиболее перспективными для развития угольной энергетики являются два месторождения Иркутского бассейна – Мугунское и Ишидейское, расположенные в районах с развитой транспортной инфраструктурой, вблизи от Восточно-Сибирской железной дороги.

Балансовые запасы категорий А+В+С₁ Мугунского бурогольного месторождения составляют 1,64 млрд т. Низшая теплота сгорания угля 18–20,6 МДж/кг, содержание золы 16–21%, серы 0,5–1,6%, общей влаги 14–15%. Содержание ценных элементов в углях не превышает подлежащих количественной оценке, кроме германия. Повышенное содержание германия (до 2,9 г/т) наблюдается в виде отдельных вкраплений сложной конфигурации, расположенных в разрезе пластов без какой-либо закономерности [5]. Строительство угольной ТЭС на Мугунском месторождении угля планируется за счет расширения мощности действующего Мугунского разреза с 6 млн т до 13 млн т.

Балансовые запасы категорий А+В+С₁ Ишидейского каменноугольного месторождения составляют 0,83 млрд т. Низшая теплота сгорания угля составляет 21–31 МДж/кг, содержание золы 17–20%, серы 0,5–1,8%, общей влаги 14–15%. Особенности разработки Ишидейского месторождения угля связаны с сложными гидрологическими и горнотехническими условиями разработки месторождения: наличие водоносного комплекса, широкое развитие на площади карьерного поля речной сети, интенсивная заболоченность (80% от площади) и распространение островной мерзлоты (30%), шестибалльная сейсмичность. Месторождение предполагается разрабатывать открытым способом. При разработке месторождения потребуются большой комплекс работ по мелиорации заболочен-



ных долин рек Ишидей и Икей. Ценных компонентов и малых элементов в углях и вмещающих породах, подлежащих количественной оценке, не выявлено. В непосредственной близости от месторождения выявлены проявления строительных материалов (песчано-гравийная смесь, глины, строительный камень) [5]. Небольшие объемы угля с низким содержанием серы добываются на месторождении Жилпоселок. Для строительства электростанции предполагается создание нового угольного разреза мощностью 12 млн т/год. Ограничением для востребованности угля месторождения как энергоносителя служит высокое содержание серы на большинстве участков месторождения. Содержание токсичных и потенциально токсичных элементов этих месторождений не превышает предельно допустимых концентраций.

Хандинское месторождение местных бурых углей расположено в 46 км от п. Магистральный и 7 км от п. Казачинское вблизи от железнодорожной трассы БАМ. Балансовые запасы категорий А+В+С₁ месторождения составляют 0,44 млрд т. Низшая теплота сгорания угля 6,8 МДж/кг, содержание золы 25%, серы 1,5%. Угли взрывоопасны по пыли, неустойчивы к окислению, но могут быть использованы как низкосортное энергетическое топливо [5]. При отсутствии конкуренции с газом Ковыктинского месторождения возможно использование Хандинских углей в качестве котельно-печного топлива в близлежащих поселках, где преобладает неблагоустроенное жилье с печным отоплением. Особую уникальность и ценность Хандинские угли представляют для углехимии. Уголь содержит 70% гуминовых кислот и по своему качественному составу является перспективным сырьем для получения буроугольного воска, углещелочных реагентов и препаратов гуминовых кислот, а также производства органоминеральных удобрений для северных районов области [5]. К настоящему времени накоплен многолетний опыт изучения состава и свойств битуминозных углей Хандинского месторождения, а также других бурых углей, пригодных для углехимии, и получены рекомендации по их перспективному применению [8–11].

Конторское месторождение расположено в Тайшетском районе Иркутской области, 15 км севернее г. Тайшет, в 5 км деревни Конторка и в 15 км от железнодорожной станции Юрты. Балансовые запасы категорий А+В+С₁ Конторского месторождения составляют 1,5 млн т. Содержание золы 15%, серы 0,8%. Требуется доразведка. В районе развита лесная и деревообрабатывающая промышленности и сельское хозяйство. Уровень благоустройства жилфонда района характеризуется низкой обеспеченностью: централизованным отоплением, горячим водоснабжением и прочим, чуть более 50%. Котельные в настоящее время работают на более качественном привозном угле, чем угли Конторского месторождения. Район не является энергодефицитным и угли месторождения пока не востребованы.

Освоение каменноугольных месторождений и угленосных площадей Тунгусского бассейна в Иркутской области началось с создания в начале 2000-х годов разреза Вереинский, находящегося на участке Жеронского месторождения. Месторождение расположено в 40 км к северо-востоку от г. Усть-Илимск. Его балансовые запасы по категориям А+В+С₁ оцениваются в 0,47 млрд т, из них 0,012 млрд т (0,03% от объемов запасов) относятся к низкокачественным тощим и окисленным. Качественные характеристики основной части месторождения: низшая теплота сгорания угля 18,0–22,3 МДж/кг, содержание золы 16,2–18,0%, серы 0,4–0,6%. Проектная мощность разреза составляет 3 млн т в год, востребованный объем добычи (менее 1 млн т) поставляется на Усть-Илимскую теплоэлектроцентраль (ТЭЦ). Освоение других участков месторождения в Катангском районе является проблематичным, поскольку они удалены от путей сообщения и слабо связаны с промышленно освоенными территориями. В перспективе тунгусские каменные угли можно рассматривать как стратегический запас для развития северных территорий области.

Извлекаемые запасы низкокачественных местных углей на вышеперечисленных месторождениях оцениваются в 260 млн т, а наибольшая потенциальная добыча этих уг-

лей в год в течение 40 лет может составить в пределах 6,5 млн т.

В настоящее время на территории области из всех месторождений угля освоено лишь 7, но основная доля добычи приходится на Черемховское, Азейское и Мугунское [4]. На угледобывающих предприятиях области добываются лишь энергетические угли, обеспеченность запасами которых составляет от 30 до 62 лет. В 2019 г. объем добычи составил 13,1 млн т, а объемы поставок 11,1 млн т.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ ОБЛАСТИ НА ПРАКТИКЕ

Уголь, добываемый в области, поставляется в основном на тепловые электростанции, а меньшая его часть в котельные (табл. 3). Доля поставок на электростанции в объеме поставок угля на внутренний рынок составляла в разные годы от 83 до 89%. Этот уголь используется для выработки электро- и теплоэнергии на ТЭЦ.

В настоящее время в структуре генерирующих мощностей электростанций области наибольшая доля приходится на объекты гидроэнергетики – 78% (в целом по России 11,2%), а на тепловые электростанции – 22% (по России 68,4%). В области действует 15 ТЭС. Являясь основным топливом для ТЭС, потребление угля за период с 2010 по 2019 гг. было подвержено колебаниям (рис. 1), в зависимости от погодных условий и водности рек, влияющей на выработку электроэнергии гидроэлектростанциями. Суммарное потребление угля в этот период имело тенденцию к снижению как в абсолютном, так и в относительном исчислении. Это происходило как с сокращением объемов производства крупными промышленными предприятиями – основными потребителями электроэнергии, так и в связи с мероприятиями по модернизации оборудования на ТЭС и ряда промышленных производств.

Таблица 3. Поставки углей Иркутской области, млн т
 Table 3. Coal supplies of the Irkutsk region, million tons

Показатель	2011	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Внутренний рынок, в том числе	12,35	8,22	8,37	8,65	9,14	10,38	9,68
электростанции	10,30	7,07	7,48	7,68	7,92	8,83	8,51
котельные и прочие потребители	2,05	1,15	0,89	0,97	1,22	1,55	1,17
На электростанции других регионов	0,11	0,68	0,01	0,88	1,00	0,73	1,45
ВСЕГО	12,46	8,90	8,38	9,53	10,14	11,11	11,13

Источник: статистические данные Центрального диспетчерского управления топливно-энергетического комплекса – филиала ФГБУ «РЭА» Минэнерго России.

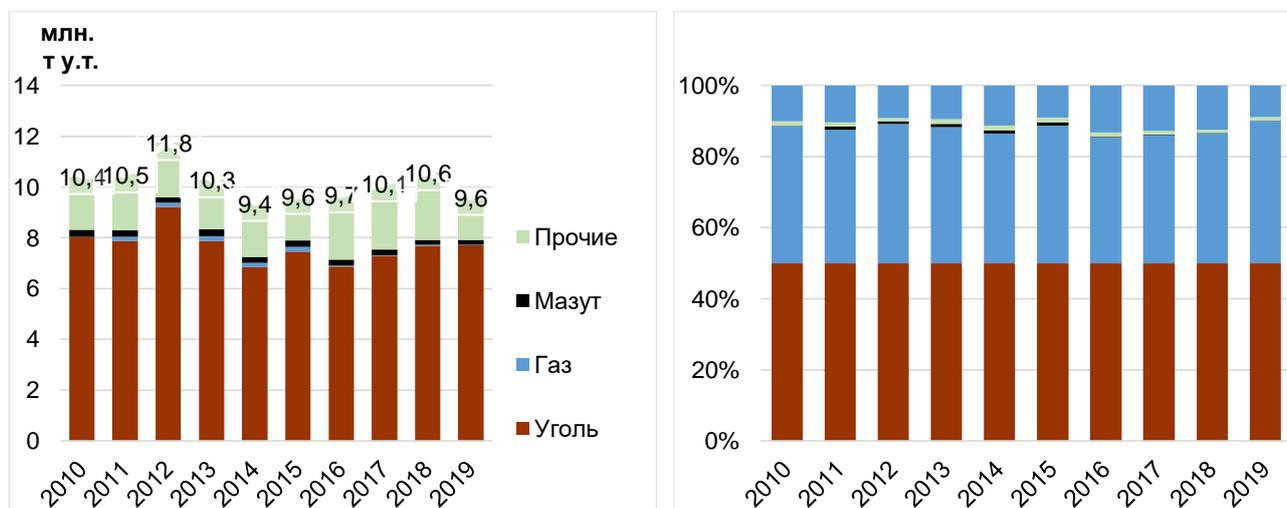


Рис. 1. Потребление топлива объектами энергетики Иркутской области⁶⁻⁸
 Fig. 1. Fuel consumption of Irkutsk region energy facilities⁶⁻⁸



Территория южной части области, где сосредоточено большинство промышленных предприятий и прочих крупных потребителей области, практически полностью охвачена централизованным электроснабжением. Наибольший отпуск электроэнергии и теплоэнергии приходится на компанию ПАО «Иркутскэнерго». Электроснабжение отдельных северных территорий области осуществляется мелкими децентрализованными дизельными электростанциями (суммарной мощностью 17,1 МВт).

На тепловых электростанциях области доля угля в общем потреблении энергоресурсов составляет 84–94%, на объектах теплоэнергетики 65–69%. Объекты ПАО «Иркутскэнерго» используют в основном уголь (более 99%). Электростанциями промышленных предприятий потребляется прочее твердое топливо, являющееся отходами производственной деятельности профильных предприятий: отходы лесопереработки, целлюлозно-бумажного производства и дрова. Из общего объема потребления угля около 53–54% приходится на выработку теплоэнергии и 46–47% на выработку электроэнергии.

На электростанции в западной и северной части области поставляются кроме иркутских углей по экономическим соображениям угли Красноярского края (табл. 4).

В качестве важного направления экономического развития области на предстоящее

пятилетие в Схеме и программе развития электроэнергетики Иркутской области на 2021–2025 гг. обозначены меры по снижению электро- энергоемкости валового внутреннего продукта. Для этого предусматривается решение двух важных задач, одной из которых является задача структурной перестройки энергопотребления (т.е. освоение менее энергоемких схем энергообеспечения), а другой – развитие малой энергетики в зоне децентрализованного энергоснабжения за счет более эффективного использования местных энергоресурсов и сокращения объемов потребления завозимых светлых нефтепродуктов.

ПРОЕКТЫ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

Иркутская область располагает достаточными ресурсами угля для развития угольной энергетики, как для снабжения собственных потребителей, так и для поставок электроэнергии в соседние регионы, в том числе на экспорт в Китай и Монголию [12].

Проекты сооружения угольных электростанций большой мощности в Иркутской области периодически то появляются в программных документах, то исчезают по разным причинам. Долгосрочной программой развития угольной промышленности России на период до 2030 г., принятой в 2014 г., в Иркутской области планировалось строительство двух ТЭС на углях Мугунского и

Таблица 4. Снабжение углем электростанций Иркутской области, млн т

Table 4. Coal supply of Irkutsk region power plants, million tons

Угли, млн т	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Иркутские	9,17	9,49	9,50	7,07	7,48	7,67	7,88	8,83	8,51
Красноярские	2,05	3,00	2,25	1,52	1,55	2,09	2,50	2,70	2,35
ВСЕГО	11,22	12,49	11,75	8,60	9,03	9,76	10,38	11,53	10,86

Источник: статистические данные Центрального диспетчерского управления топливно-энергетического комплекса – филиала ФГБУ «РЭА» Минэнерго России.

⁶Схема и программа развития электроэнергетики Иркутской области на 2020–2024 гг. Утв. указом Губернатора Иркутской области от 22.08.2019.

⁷Схема и программа развития электроэнергетики Иркутской области на 2016–2020 гг. Утв. указом № 179-уг Губернатора Иркутской области от 23.07.2015.

⁸Схема и программа развития электроэнергетики Иркутской области на 2021–2025 гг. Утв. указом № 124-уг Губернатора Иркутской области от 29.04.2020.

Ишидейского месторождений. В последующие годы указанные объекты рассматривались в работах ИСЭМ, где определялись место и роль их в покрытии перспективной потребности в электроэнергии и энергетических углях области и Байкальского региона [13].

На Мугунском месторождении планировалось строительство угольной теплоэлектростанции мощностью 3200 МВт, а на Ишидейском – 2000 МВт. Лицензия на разработку Ишидейского месторождения в 2001 г. получила компания СУЭК, а в 2004 г. компания отказалась от прав пользования Ишидейским месторождением из-за неблагоприятной конъюнктуры угольного рынка. В реализации проектов кроме российской компании предполагалось участие энергетических компаний Китайской Народной Республики.

При удельном расходе топлива 276 г у.т./кВт·ч потребность в угле Мугунского месторождения составляет 5,74 млн т у.т., а в натуральном исчислении около 11 млн т, а Ишидейского 3,59 млн т у.т, или около 6 млн т.

Кроме Мугунской и Ишидейской ТЭС, в программных документах рассматривались проекты, ориентированные на экспорт электроэнергии и в других регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока: конденсационная электростанция (КЭС) на угле в Республике Бурятия и Забайкальском крае (Олонь-Шибирская и Новая Харанорская), Ургальская ТЭС и другие⁹⁻¹¹ [14]. Эти электростанции могут составить конкуренцию экспортно-ориентированным ТЭС Иркутской области, хотя по многим показателям сооружение Мугунской ТЭС является более предпочтительным [15].

Для удовлетворения роста спроса на электро- и теплоэнергию в городах и других развивающихся объектах области планируется реконструкция и расширение мощностей действующих угольных электростанций: Ир-

кутской ТЭЦ-9, Ново-Иркутской ТЭЦ, Усть-Илимской ТЭЦ и Ново-Зиминской ТЭЦ. В целом основное развитие крупной энергетики юга Иркутской области будет осуществляться за счет угольной генерации.

Для надежного обеспечения электроснабжения децентрализованных потребителей северных территорий области в настоящее время остро стоит проблема модернизации дизельной генерации и перехода на использование местных видов топлива, в частности на местный уголь. Предпосылки такого перехода имеются в Катангском, Братском, Киренском и Казачинско-Ленском районах, на которые приходится около 80% всей вырабатываемой в настоящее время на дизельных электростанциях электроэнергии¹². В этих районах, где имеются месторождения местных углей, весьма перспективно внедрение энергоисточников распределенной генерации, которая позволяет обеспечить устойчивое развитие территорий с низкой плотностью электропотребления, где централизованное электроснабжение оказывается затратным [16].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ ОБЛАСТИ

Широкое использование энергетических углей на электростанциях России в традиционных паровых энергоблоках продолжает быть коммерчески эффективным не только в настоящее время, но будет выгодно и в перспективе [17, 18]. Несмотря на складывающееся соперничество между «угольной» и «газовой» генерацией, предпочтительность первой будет сохраняться еще длительное время, особенно в восточных регионах России. Основные проблемы при этом сводятся к необходимости разработки и внедрения новых современных технологий в угольной

⁹Схема территориального планирования РФ в области энергетики до 2030 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/media/files/41d4a33bd567e72145d3.pdf> (13.08.2020).

¹⁰Стратегия социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.city-strategy.ru/UserFiles/Files/Strategy%20DVFO_2025.pdf (13.08.2020).

¹¹Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики России до 2020 г. с учетом перспективы до 2030 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://proatom.ru/files/genshema.doc> (13.08.2020).

¹²Схема и программа развития электроэнергетики Иркутской области на 2021–2025 гг. Утв. указом № 124-уг Губернатора Иркутской области от 29.04.2020.



энергетике. Эта проблема широко обсуждается в многочисленных работах как российских, так и зарубежных исследователей [7, 17–22]. Здесь намечен целый ряд важных направлений, по которым будет происходить внедрение современных технологий, и в первую очередь путем совершенствования оборудования угольных ТЭС с целью повышения их технической эффективности и улучшения экологических показателей.

Особенно остро эта проблема стоит для сжигания низкокачественных энергетических углей [20], к каковым относится и значительная часть иркутских углей.

Рассматривая возможности их использования для Иркутской энергетики, можно сформировать возможный коридор их вовлечения в энергетический баланс области без привязки к периодам времени.

Минимальный объем потребления иркутских энергетических углей подразумевает сохранение существующих мощностей угольных электростанций, возможный переход отдельных энергоисточников, в первую очередь котельных на газ и реализацию энергоемких проектов развития промышленности.

Максимально возможный объем потребления энергетических углей включает еще и строительство ТЭС для экспорта электроэнергии. При сохранении действующих угольных электростанций возможен в перспективе умеренный рост спроса на электро- и теплоэнергию за счет реализации проектов развития горнодобывающей промышленности и улучшения энергоснабжения прочих потребителей.

В перспективе наибольший прирост использования энергетических углей возможен в индустриально-аграрном Тулунском районе с развитой транспортной инфраструктурой, где расположены наиболее крупные месторождения бурых и каменных углей – Ишидейское и Мугунское. Кроме угольных месторождений район располагает месторождениями редких металлов: титана, железа, меди, свинца, цинка, олова, бериллия, редкозе-

мельных элементов (иттрий, гадолиний, самарий), ртути, золота, агросырья и торфов, пресных и минеральных вод. По отдельным месторождениям подсчитаны и утверждены запасы минеральных ресурсов и имеются проекты разработки месторождений. В разной степени разработки и реализации находятся проекты разработки минерального сырья: горно-металлургического комбината на базе Зашихинского редкометального месторождения (ЗАО «Техноинвест альянс») [23]; предприятий по производству высококачественного стекловолокна на основе кварцевого песка (ООО «Тулунский завод стеклокомпозитов»); карбида кремния и микропорошков и гидроксида лития (АО «Ангарский электролизно-химический комбинат»). Развитие горнорудной и перерабатывающей промышленности в этих районах потребует также развитие энергетики, и с наибольшей вероятностью – угольной, как наиболее обеспеченной ресурсами. Дополнительная потребность в электро- и теплоэнергии создастся также при сооружении жилых комплексов в области, в первую очередь в ее крупных городах.

В ближайшей перспективе существенного прироста спроса на электрическую энергию угольной генерации в энергосистеме Иркутской области не прогнозируется¹³. С большой вероятностью прирост потребления энергетических углей за счет ввода на территории области новых крупных потребителей будет отодвигаться на неопределенный срок. В перспективе структура выработки электроэнергии может измениться: доля ГЭС в выработке электроэнергии сократится, а угольной генерации возрастет (рис. 2), в большей или меньшей мере в зависимости от ввода экспортных электростанций, а за счет ввода Ленской КЭС-ПГУ на газе может появиться газовая составляющая.

Проекты экспорта электроэнергии из области нацелены в основном на рынок электроэнергии Китая. Вопрос о рентабельности экспорта электроэнергии в Китай и надежности этой страны (как импортера электроэнер-

¹³Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2019–2025 гг. Утв. приказом № 174 Минэнерго России от 28.02.2019. 57 с.

гии) требует дополнительного изучения. Сроки реализации зависят от готовности китайских партнеров покупать электроэнергию по приемлемым ценам. Из представленных проектов наиболее предпочтительным представляется проект реализации угольной ТЭС на Мугунском угле [15], но реализация этого проекта может быть отодвинута за пределы 2030 г. Проблемы использования углей месторождений Иркутской области связаны, во-первых, с неоднородностью качества углей, во-вторых, с высоким содержанием в них серы [24].

Переход на безуглеродную энергетику для Сибири и Иркутской области в частности в настоящее время не подлежит рассмотрению. Отказ обусловлен не только неблагоприятным соотношением цен угля и газа, но и в значительной степени социально-экономическими последствиями закрытия градообразующих для Иркутской области угледобывающих предприятий, возникающими при этом проблемами с закупкой угля для коммунально-бытовых нужд и другими причинами.

Вовлечение низкокачественных и местных углей в хозяйственный оборот будет зависеть в основном от их востребованности и в первую очередь от их местоположения относительно потенциальных потребителей, а

также от качественных характеристик углей. Наиболее широкое использование местных углей предполагается в поселках на севере области в качестве топлива для мини-ТЭЦ [25]. При этом в качестве важнейшего технического направления получают развитие новые технологии сжигания местных видов топлива в кипящем слое, позволяющие заметно снижать выбросы вредных веществ [26]. Вторым возможным направлением использования местных углей является их энерготехнологическая переработка с одновременным производством тепловой и электрической энергии, коксовой продукции и водорода [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие значительных запасов энергетических углей в Иркутской области позволяет рассматривать их не только как надежный источник топлива на длительную перспективу, но и как резерв для обеспечения нужд энергетики в случае снижения выработки электроэнергии на ГЭС в периоды маловодности рек.

Потребление угля электростанциями подвержено значительным колебаниям, что оказывает негативное влияние на социально-экономические условия в регионах добычи.

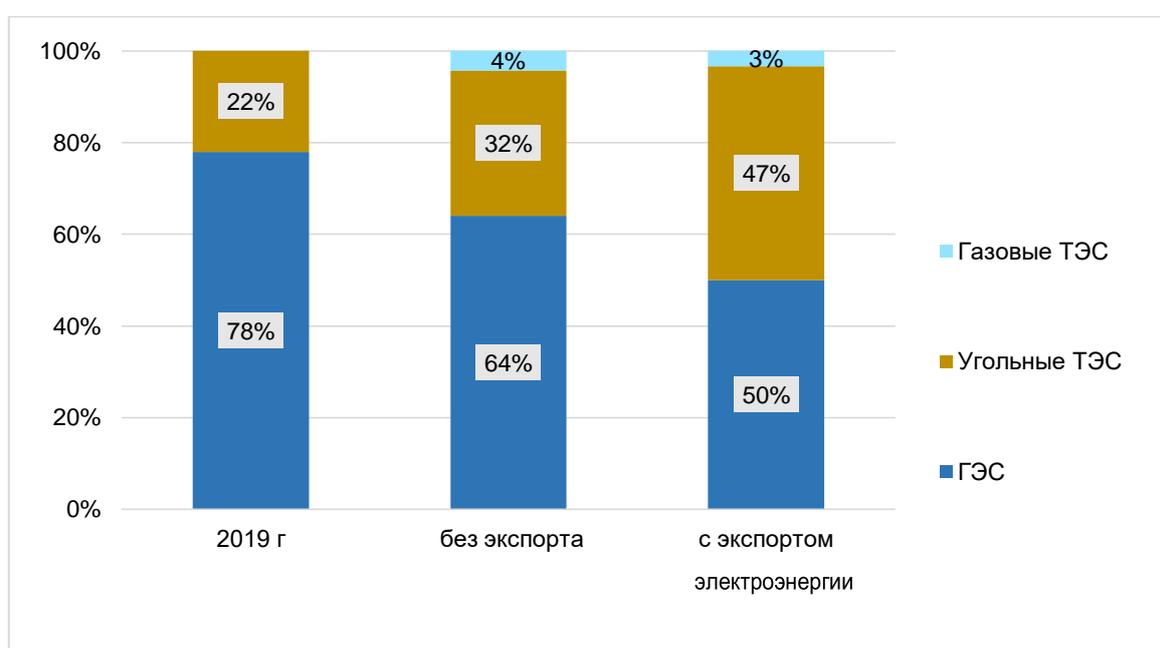


Рис. 2. Структура выработки электроэнергии в Иркутской области (расчеты авторов)
Fig. 2. Structure of electrical energy generation in the Irkutsk region (authors' calculations)



В Иркутской области, в особенности на севере, имеются энергодефицитные территории, обладающие высоким потенциалом промышленного развития. Устранение дефицита электро- и теплоэнергии возможно за счет рационального использования потенциала местных энергоресурсов, местных угольных. В зависимости от сценария развития экономики области возможен рост производства электроэнергии в Иркутской области при увеличении доли угольной генерации и сокращении доли ГЭС. Переход на безуглеродную энергетику для Иркутской области в настоящее время не подлежит рассмотрению.

Впервые выделены ресурсы низкокачественных местных углей и дана оценка возможностей их вовлечения в качестве потенциальных энергоресурсов. Низкосортные и местные угли месторождений Иркутской области не имеют перспектив широкого использования ввиду наличия в области ресурсов

более качественных углей, а для энергодефицитных районов конкуренции с другими энергоносителями (газ, гидроэнергия, угли крупных месторождений). ТЭС малой мощности в этих районах могут составить конкуренцию для источников, главным образом теплоэнергии на другом виде топлива, только при использовании передовых технологий сжигания угля. Они могут рассматриваться только как стратегический запас для нужд теплоэнергетики и углехимии.

Значительный рост использования энергетического угля Иркутской области возможен только на электростанциях, ориентированных на экспорт электроэнергии. Амбициозные проекты сооружения таких электростанций на углях Мугунского и Ишидейского месторождений нуждаются в дополнительных проработках, поскольку качество этих углей в пределах месторождений неоднородно.

Список литературы

1. Новак А.В. Угольная промышленность России: история на века // Энергетическая политика. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://energypolicy.ru/anovak-ugolnaya-promyshlennost-ross/business/2020/13/17/> (02.08.2020).
2. BP Energy Outlook – 2019 edition [Электронный ресурс]. URL: <https://nangs.org/analytics/bp-bp-energy-outlook-pdf-xlsx-pptx> (02.08.2020).
3. Final electricity consumption // EnerOutlook 2050 [Электронный ресурс]. URL: <https://eneroutlook.enerdata.net/forecast-world-electricity-consumption.html> (02.08.2020).
4. Санеев Б.Г., Агафонов Г.В., Еделева О.А., Иванова И.Ю., Ижбулдин А.К., Кононов Ю.Д. [и др.]. Топливо-энергетический комплекс Иркутской области: современное состояние и перспективы развития / под ред. Б.Г. Санеева, П.А. Воронина. М.: ИД «Энергия», 2013. 304 с.
5. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2019 года. Вып. 91, Уголь, Том VII, Сибирский федеральный округ, часть 2. М.: Министерство Природных Ресурсов и Экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, Российский Федеральный геологический фонд. 2019. 314 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-neдр> (02.08.2020).
6. Быкадоров В.С., Череповский В.Ф. Угольная база России. Том III. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири Южная часть (Красноярский край, Канско-Ачинский бассейн; Республика Хакасия, Минусинский бассейн; Республика Тыва, Улугхемский бассейн; Иркутская область, Иркутский бассейн и угольные месторождения Предбайкалья). М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. 488 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geokniga.org/books/15173> (02.08.2020).
7. Афанасьев А.А. Уголь VS газ в электроэнергетике (обзор состояния и перспективы) // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 9. С. 2–10. <http://doi.org/10.31857/S023336190001701-7>
8. Вязова Н.Г., Пройдаков А.Г., Шаулина Л.П., Шмидт А.Ф. Использование молодых бурых углей Хандинского месторождения Иркутской области // Химия твердого топлива. 2019. № 3. С. 3–8. <http://doi.org/10.1134/S0023117719030113>
9. Покуль Т.В., Крюкова В.Н., Комарова Т.Н., Белоногова Л.Н., Лобанова Г.Л., Вязова Н.Г. и др. Битуминозные бурые угли Хандинского месторождения западного региона БАМа // Химия твердого топлива. 1988. № 1. С. 3–8.
10. Жеребцов С.И. Экстракционные технологии и продукты переработки бурых и некондиционных углей // Уголь. 2009. № 7. С. 63–66.
11. Кузнецов Б.Н., Шендрик Т.Г., Щипко М.Л. Глубокая переработка бурых углей с получением жидких топлив и углеродных материалов. Вып. 36 / отв. ред. Г.И. Грицко. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 212 с.
12. Lagerev A., Khanaeva V., Smirnov K. A comprehensive assessment of comparative effectiveness of projects for power export from East Siberia to China: a methodological approach and results of its application // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 27.

<http://doi.org/10.1051/e3sconf/20182702003>

13. Топливно-энергетический комплекс Байкальского региона: современное состояние, перспективы развития / под ред. Б.Г. Санеева. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2015. 176 с.

14. Сценарные условия развития электроэнергетики России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL:

https://atompool.ru/images/data/gallery/1_8337__usloviya_elektroenergetiki_na_period_do_2030_goda.pdf (02.08.2020).

15. Смирнов К.С. Комплексная оценка реализации проектов экспорта российской электроэнергии из Восточной Сибири в Китай // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 10. С. 131–137. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-131-137>

16. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Илюшин П.В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 4–17. <http://doi.org/10.1134/S0040363619120038>

17. Тумановский Ф.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 3–13. <http://doi.org/10.1134/S004036361706008X>

18. Макаров А.А., Веселов Ф.В., Макарова А.С., Урванцева Л.В. Комплексная оценка технологической трансформации электроэнергетики России // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 3–18. <http://doi.org/10.1134/S0040363619100047>

19. Oberschelp C., Pfister S., Raptis C.E., Hellweg S. Global emission hotspots of coal power generation // Nature Sustainability. 2019. Vol. 2. P. 113–121. <http://doi.org/10.1038/s41893-019-0221-6>

20. Mills S. Low quality coals – key commercial, environmental and plant considerations // IEA Clean Coal Centre. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://usea.org/sites/default/files/Low%20quality%20coal%20-%20key%20commercial%2C%20environmental%20and%20plant%20considerations%20-ccc270.pdf> (02.08.2020).

21. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Головтеева А.Н., Сиваковский А.М. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для Российских ТЭС // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 60–72. <http://doi.org/10.1134/S0040363619040064>

22. Yucekaya A. Multi-objective fuel supply for coal-fired power plants under emission, transportation and operational constraints // Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy. 2013. Vol. 8. Issue 2. P. 179–189. <https://doi.org/10.1080/15567249.2010.551822>

23. Проект строительства горно-металлургического комбината на базе Зашихинского месторождения был представлен в рамках Дня Забайкальского инвестора в Москве [Электронный ресурс]. URL: <https://columbite.ru/page9858398.html> (12.08.2020).

24. Кудряшов А.Н., Елманов А.В., Киселева И.И., Бибикова Ю.Д. Оценка доли оксидов серы, связываемых летучей золой, при сжигании мугунского и ирбейского углей в котлоагрегатах Ново-Иркутской ТЭЦ // ИргТУ. 2017. Т. 21. № 3. С. 110–122. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-110-122>

25. Бушуев В.В., Воропай Н.И., Мастепанов А.М., Шафранчик Ю.К. Энергетическая безопасность России. Новосибирск: Наука, 1998. 306 с.

26. De Vita A., Kielichowska I., Mandatova P., Capros P., Dimopoulou E., Evangelopoulou S., et al. Technology pathways in decarbonisation scenarios // Asset. 2018. [Электронный ресурс]. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2018_06_27_technology_pathways_-_finalreportmain2.pdf (12.08.2020).

27. Баякин С.Г. Актуальный вектор развития угольной энергетики // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: сб. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Клишина, З.Р. Исмагилова, В.Ю. Блюменштейна, С.И. Протасова, Г.П. Дубинина (г. Кемерово, 18–21 сентября 2012 г.). Кемерово: СО РАН, ООО КВК «Экспо-Сибирь», 2012. С. 212–217.

References

1. Novak AV. Russian coal industry: history through the centuries. *Energeticheskaya politika*. 2020. Available from: <https://energypolicy.ru/a-novak-ugolnaya-promyshlennost-ross/business/2020/13/17/> [Accessed 2nd August 2020]. (In Russ.)

2. BP Energy Outlook – 2019 edition. Available from: <https://nangs.org/analytics/bp-bp-energy-outlook-pdf-xlsx-pptx> [Accessed 2nd August 2020].

3. Final electricity consumption. *EnerOutlook 2050*. Available from: <https://eneroutlook.enerdata.net/forecast-world-electricity-consumption.html> [Accessed 2nd August 2020].

4. Saneev BG, Agafonov GV, Ivanova IYu, Izbuldin AK, Kononov YuD, Korneev AG. Fuel and energy complex of Irkutsk region: current state and prospects for development / ed. BG Saneev, PA Voronin. Moscow: Energiya; 2013, 304 p. (In Russ.)

5. State balance of mineral reserves of the Russian Fed-

eration on 1st January 2019. Issue 91, Coal, Volume VII, Siberian Federal District, Part 2. Moscow: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Federal Agency for Subsoil Use, Russian Federal Geological Fund, 2019, 314 p. Available from: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr.html> [Accessed 2nd August 2020].

6. Bykadorov VS, Cherepovskij VF. Coal base of Russia. Volume III. Coal basins and deposits of in the Southern part of Eastern Siberia (Krasnoyarsk Territory, Kansk-Achinsk basin; Republic of Khakassia, Minusinsk basin; Republic of Tyva, Ulugkhemsky basin; Irkutsk region, Irkutsk basin and Cisbaikalia coal deposits). Moscow: Geoinformmark; 2002, 488 p. Available from: <https://www.geokniga.org/books/15173.html> [Accessed 2nd August 2020].

7. Afanasyev A. Coal vs gas in the power industry (over-



- view of the state and prospects). *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2018;9:2–10. (In Russ.) <http://doi.org/10.31857/S023336190001701-7>
8. Vyazova NG, Projdakov AG, Shaulina LP, Shmidt AF. Applications of young brown coals from the Khandinsky deposit in Irkutsk oblast. *Himiya tverdogo topliva*. 2019;3:3–8. (In Russ.) <http://doi.org/10.1134/S0023117719030113>
9. Pokul' TV, Kryukova VN, Komarova TN, Belonogova LN, Lobanova GL, Vyazova NG, et al. Bituminous brown coals of the Khandinsky deposit in the western region of the Baikal-Amur Mainline. *Himiya tverdogo topliva*. 1988;1:3–8. (In Russ.)
10. Zherebcov SI. Extraction technologies and products of processing of brown and sub-standard coals. *Ugol'*. 2009;7:63–66. (In Russ.)
11. Kuznecov BN, Shendrik TG, Shchipko ML. *Deep processing of brown coal to obtain liquid fuels and carbon materials*. Issue 36 / ed. GI Gricko. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012, 212 p. (In Russ.)
12. Lagerev A, Khanaeva V, Smirnov K. A comprehensive assessment of comparative effectiveness of projects for power export from East Siberia to China: a methodological approach and results of its application. In: *E3S Web of Conferences*. 2018;27. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20182702003>
13. Baikal region fuel and energy complex: modern state, development prospects / ed. BG Saneev. Novosibirsk: Geo; 2015, 176 p. (In Russ.)
14. Scenario conditions for the development of Russian electric power industry for the period up to 2030. Available from: https://atompool.ru/images/data/gallery/1_8337__usloviya_elektroenergetiki_na_period_do_2030_goda.pdf [Accessed 2nd August 2020]. (In Russ.)
15. Smirnov KS. Comprehensive assessment of Russian Eastern Siberia to China energy export project implementation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(10):131–137. (In Russ.) <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-131-137>
16. Filippov SP, Dilman MD, Ilyushin PV. Distributed generation of electricity and sustainable regional growth. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019;12:4–17. (In Russ.) <http://doi.org/10.1134/S0040363619120038>
17. Tumanovskii AG. Prospects for the development of coal-steam plants in Russia. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2017;6:3–13. (In Russ.) <http://doi.org/10.1134/S004036361706008X>
18. Makarov AA, Veselov FV, Makarova AS, Urvantseva LV. Comprehensive assessment of Russia's electric power industry's technological transformation. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019;10:3–18. <http://doi.org/10.1134/S0040363619100047>
19. Oberschelp C, Pfister S, Raptis CE, Hellweg S. Global emission hotspots of coal power generation. *Nature Sustainability*. 2019;2:113–121. <http://doi.org/10.1038/s41893-019-0221-6>
20. Mills S. Low quality coals – key commercial, environmental and plant considerations. *IEA Clean Coal Centre*. 2016. Available from: <https://usea.org/sites/default/files/Low%20quality%20coal%20-%20key%20commercial%2C%20environmental%20and%20plant%20considerations%20-ccc270.pdf> [Accessed 2nd August 2020].
21. 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. <http://doi.org/10.1134/S0040363619040064>
22. Yucekaya A. Multi-objective fuel supply for coal-fired power plants under emission, transportation and operational constraints. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*. 2013;8(2):179–189. <https://doi.org/10.1080/15567249.2010.551822>
23. Construction project of a mining and metallurgical plant based on the Zashikhinsky field was presented as a part of the Trans-Baikal Investor Day in Moscow. Available from: <https://columbite.ru/page9858398.html> [Accessed 12th August 2020].
24. Kudryashov AN, Elmanov AV, Kiseleva II, Bibikova ID. Estimation of sulfur oxide proportion bound by fly ash under Mugunsky and Irbeisky coal combustion in Novorirkutsk CHP boiler units. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):110–122. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-110-122>
25. Bushuev VV, Voropaj NI, Mastepanov AM, Shafranchik YuK. Energy security of Russia. Novosibirsk: Nauka; 1998, 306 p. (In Russ.)
26. De Vita A, Kielichowska I, Mandatova P, Capros P, Dimopoulou E, Evangelopoulou S, et al. Technology pathways in decarbonisation scenarios. *Asset*. 2018. Available from: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2018_06_27_technology_pathways_-_finalreportmain2.pdf [Accessed 12th August 2020].
27. Bayakin SG. Actual development vector of coal energy. In: *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii. Novye podhody k razvitiyu ugol'noj promyshlennosti: sbornik trudov XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Energy security of Russia. New approaches to coal industry development: collected articles of XIV International scientific and practical conference / ed. VI Klishina, ZR Ismagilova, VYu Blyumenshtejna, SI Protasova, GP Dubinina*. 18–21 September 2012, Kemerovo. Kemerovo: SO RAN, OOO KVK "Ekspo-Sibir"; 2012, p. 212–217. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Такайшвили Людмила Николаевна,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Лаборатория топливно-энергетического комплекса
Сибири и Дальнего Востока,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: luci@isem.irk.ru

Агафонов Глеб Владимирович,
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
Лаборатория комплексных и межрегиональных
проблем энергетики,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: gleb@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 08.11.2020; одобрена после рецензирования 30.11.2020; принята к публикации 21.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyudmila N. Takaishvili,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Fuel and Energy Complex Laboratory of Siberia
and the Far East,
Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
✉ e-mail: luci@isem.irk.ru

Gleb V. Agafonov,
Cand. Sci. (Eng.),
Researcher, Laboratory of Complex and Interregional
Energy Problems,
Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: gleb@isem.irk.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 08.11.2020; approved after reviewing 30.11.2020; accepted for publication 21.12.2020.



Экономическое обоснование использования вертикально-осевой ветроэнергетической установки в условиях ветрового режима России

© Б.П. Хозяинов, Т.Н. Свистунова

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

Резюме: Цель – экономически обосновать эффективность использования вертикально-осевых ветроэнергетических установок, использующих принцип дифференциального лобового сопротивления лопастей, в условиях малых природных скоростей ветра от 1 до 15 м/с. Сметная стоимость определена ресурсно-индексным методом. Расчеты выполнены в два этапа: 1 – составлена ведомость, в которой определен расход ресурсов на проектный объем работ по сборникам государственных элементных сметных норм; 2 – составлена локальная ресурсная смета, расход ресурсов в натуральных измерителях переведен в стоимостные (в ценах 2000 г.). Локальные сметные расчеты составлены с помощью программного комплекса ГРАНД-СМЕТА. Все расходы на материалы для изготовления ветротурбины и поддерживающей конструкции принимались по коммерческой стоимости, которая переводилась с помощью дефляторов на бюджетную стоимость октября 2019 г. К стоимости материалов и эксплуатации машин (без оплаты труда машинистов), к сумме оплаты труда рабочих монтажников и машинистов использовались индексы перехода от цен 2000 г. к ценам 2019 г. Стоимость комплекта установки, рассчитанной по прочности на природную скорость 20 м/с, составила 1643,591 тыс. руб., что позволило определить стоимость 1 кВт·ч, зависящую от срока эксплуатации и среднегодовой скорости ветра. При скорости ветра 4 м/с стоимость составила 7,12 руб/кВт·ч; при скорости ветра 8 м/с – 2,19 руб/кВт·ч, соответственно. При скоростях ветра от 5 м/с до 11 м/с при равных промежутках времени воздействия средняя стоимость 1 кВт·ч будет в пределах 3,14 руб/кВт·ч. Проведенные исследования подтвердили эффективное использование предлагаемой вертикально-осевой ветроэнергетической установки в условиях малых природных скоростей ветра (являющейся конкурентоспособной в сравнении с традиционными способами выработки энергии) на территории России.

Ключевые слова: капитальные затраты, стоимость, эффективная работа, ветротурбина, мощность, вертикальная ось

Для цитирования: Хозяинов Б.П., Свистунова Т.Н. Экономическое обоснование использования вертикально-осевой ветроэнергетической установки в условиях ветрового режима России. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1285–1296. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1285-1296>

Economic justification for the use of a vertical axis wind power plant in wind conditions of Russia

Boris P. Khozyainov, Tatyana N. Svistunova

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Abstract: The purpose of the study is to provide an economic justification of the application efficiency of vertical axis wind-driven power plants using the principle of differential blade drag under low natural wind speeds from 1 to 15 m/s. The estimated cost is determined by the resource-index method. Calculations are made in two stages: at the first stage a statement is compiled where the consumption of resources for the design volume of work is determined according to the state unit estimate standards collections; at the second stage a local resource estimate is made, and the resource consumption in natural units is converted to cost estimates (in the prices of 2000 year). Local estimates are made using the GRAND-SMETA software package. All costs of construction materials for the wind turbine and supporting structure were assumed at the commercial cost, which was translated to the budget cost of October 2019 using deflators. The transition indices from the prices of 2000 to the prices of 2019 are applied to the cost of materials and machinery operation (without remuneration of engine-drivers) as well as to the amount of labour remuneration for installers and engine-drivers. The cost of the installation set calculated by the strength at 20 m/s natural speed is 1643.591 thousand rubles. This allowed to determine the cost of 1 kWh, which depends on the service life and the average annual wind speed. At a wind speed

of 4 m/s the cost is 7.12 rub/kWh; at a wind speed of 8 m/s it is 2.19 rub/kWh. At wind speeds from 5 m/s to 11 m/s with equal exposure time intervals, the average cost of 1 kWh will be within 3.14 rub/kWh. Conducted studies have confirmed the effective use of the proposed vertical axis wind power plant under conditions of low natural wind speeds in Russia. The installation is proved to be competitive in comparison with the traditional methods of energy generation.

Keywords: capital expenditures, cost, efficient operation, wind turbine, power, vertical axis

For citation: Khozyainov BP, Svistunova TN. Economic justification for the use of a vertical axis wind power plant in wind conditions of Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1285–1296. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1285-1296>

ВВЕДЕНИЕ

Строительство предприятий и различных сооружений в неосвоенных территориях сопряжено с трудностями энергоснабжения. Приходится решать задачи по экономической эффективности вариантов энергоснабжения. При этом следует учитывать:

- а) большую протяженность линий электропередач;
- б) осуществление энергоснабжения с помощью дизельных электростанций;
- в) использование ветро- и гидроэнергетики.

Если строительство находится в районах, где скорость ветра 3 м/с и более, то возможно использование ветроэнергетики.

Тогда следует напомнить, что одной из причин недостаточного развития ветроэнергетики в России является то, что традиционные ветротурбины запускаются при ветре 5...7 м/с, а это неприемлемо для ветрового режима России (рис. 1).

Актуальным представляется исследование экспериментальных и теоретических основ новых вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВО ВЭУ) в условиях ма-

лых природных скоростей ветра.

На кафедре строительных конструкций, водоснабжения и водоотведения Кузбасского государственного технического университета была разработана ВО ВЭУ, использующая принцип дифференциального лобового сопротивления, которая работает в условиях малых природных скоростей ветра. Это дальнейшее развитие ветрогенераторов Савониуса. Среди заметных исследований были отмечены как зарубежные авторы [1–8], так и отечественные ученые, среди них можно назвать Д.Н. Горелова [9] и других. Для разработки методик по вычислению угловой скорости вращения ветротурбины, вращающего момента и мощности были использованы исследования авторов Дж. Л. Менет, Н. Боурабао и Дж. Твайделла.

Основная идея работы заключалась в:

– расширении ветрового диапазона работы ветротурбины от 1 до 15 м/с в результате применения ветронаправляющих экранов, позволяющих повысить скорости воздушного потока в объеме ветротурбины и предотвратить ее разрушения при ураганах;



Рис. 1. Среднегодовая скорость ветра
Fig. 1. Average annual wind speed



– повышении эффективности работы ветротурбины с применением новых лопастей, использующих принцип «дифференциального лобового сопротивления» с изменяющимися размерами и высокими аэродинамическими характеристиками (в данной статье это не учитывалось) с использованием исследований, указанных в литературном источнике [4];

– разработке новых методик по вычислению угловой скорости вращения ветротурбины, величины вращающего момента и ее мощности, с учетом численного моделирования, указанного в источнике [5];

– обосновании геометрических размеров поддерживающей конструкции и всех основных элементов ветротурбины, ее массы и комплектации для более эффективной работы с использованием предлагаемых методик, представленных в трудах [2, 3].

В данной статье дается обоснование экономической эффективности работы предлагаемой ВО ВЭУ. Используя данные теоретических разработок, выполненных ранее^{1,2} [10–15], были разработаны новые методики по вычислению оптимальных: угловой скорости вращения, вращающего момента и мощности ветротурбины с использованием новых конструкций лопастей [16–20].

Постановка задачи. Доказать экономическую эффективность использования вертикально-осевой ветроэнергетической установки и ее конкурентоспособность в сравнении с традиционными способами выработки энергии в условиях ветрового режима России.

ОБЗОР МЕТОДОВ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ

Для анализа методов экономического обоснования был использован источник³.

1. Базисно-индексный метод определения стоимости. Этот метод определяет стоимость работ, используя данные единичных расценок и показатели индексов перерасчета в текущие цены. Следовательно, базисно-

индексный метод может получать сметную стоимость на дату ее составления. Кроме того, сметная прибыль, налог на добавленную стоимость и накладные расходы прибавляются к сумме прямых затрат. Этот метод используется чаще всего для разработки смет на 1 вид работ.

2. Ресурсный метод определения стоимости. Этот метод применяется для определения цен на разработку смет по реальной стоимости частей, составляющих смету. Метод точен, но трудоемок, и обосновать цену на некоторый материал сложно.

3. Ресурсно-индексный метод. Это комбинированный метод применяется для вычисления сметной стоимости, который соединяет в себе ресурсный и индексный методы. С помощью первого метода может быть вычислена стоимость на материалы в действующих ценах, заработная плата рабочих с помощью дополнительных коэффициентов.

4. Базисно-компенсационный метод. Этот метод выполняет сложение стоимости, определяемой базисной ценой с дополнением затрат, обусловленных ростом цен на потребляемые ресурсы. В итоге стоимость определяется базисными ценами на начало строительства и всех затрат – это так называемый компенсационный фонд.

5. На основе стоимостных показателей по объектам-аналогам. В этом методе для смет принимаются расценки из смет на аналогичные объекты.

При анализе и сравнении методов для дальнейших расчетов был выбран ресурсно-индексный метод, который считается наиболее точным и больше подходит для нашего случая.

Основным документом для определения сметной стоимости была принята «Методика определения сметной стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации» (МДС 81-35-2004⁴).

¹ Безруких П.П. Ветроэнергетика: справ. и метод. пособ. М.: ЭНЕРГИЯ, 2010. 320 с.

² Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика: учеб. пособ. для вузов. М.: Высш. шк., 1970. 424 с.

³ Ардинов В.Д., Барановская Н.Т., Курочкин А.И. Сметное дело в строительстве: Самоучитель. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: Питер, 2017. 464 с.

⁴ МДС 81-35-2004. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035529> (27.08.2020).

Расчеты выполнены в два этапа. На первом составлялась ведомость, в которой определялся расход ресурсов (трудовых, технических, материальных) на проектный объем работ по сборникам государственных элементных сметных норм (ГЭСН). На втором составлялась локальная ресурсная смета, в которой расход ресурсов в натуральных измерителях переводился в стоимостные (сметные цены 2000 г.). Расчеты выполнены с помощью программного комплекса ГРАНД-СМЕТА.

Сметная стоимость, определенная первоначально в базисном уровне цен 2000 г., переведена в уровень цен октября 2019 г. с помощью региональных индексов, предлагаемых Центром инвестиционных программ и ценообразования в строительстве и публикуемых ежемесячно в сборниках «Цены в строительстве» (в нашем случае № 10, октябрь 2019 г.).

Коэффициенты перехода от цен 2000 г. к ценам 2019 г. Применены к:

- стоимости материалов;
- сумме оплаты труда рабочих-монтажников и машинистов;
- стоимости эксплуатации машин (без оплаты труда машинистов).

Следует заметить, что в ряде случаев нормативный расход материалов корректировался под технические возможности ВО ВЭУ, а отсутствующие сметные цены на материалы заменялись коммерческими, которые с помощью дефляторов переводились в сметные цены октября 2019 г.

Математическая модель. Для определения стоимости 1кВт·ч в рублях необходимо знать $KЗ$ – капитальные затраты в рублях, N – мощность ветротурбины (кВт), C_o – срок эксплуатации (лет), D – дней в году, $Ч$ – число часов в сутках. Тогда стоимость 1 кВт·ч в рублях ($Ц$) сможем рассчитать по формуле:

$$Ц = \frac{KЗ}{N \cdot C_o \cdot D \cdot Ч} \quad (1)$$

Для определения стоимости 1 кВт·ч в рублях для ветротурбины, установленной для конкретной местности, необходимо знать процентное соотношение скоростей ветра в заданный период времени (например, года). В таком случае воспользуемся формулой:

$$\begin{aligned} \sum Ц_{\text{СР.ГОД}} = Ц_3 &= \frac{KЗ}{N \cdot C_o \cdot D \cdot Ч} \cdot n_{0,3} + \\ + Ц_4 &= \frac{KЗ}{N \cdot C_o \cdot D \cdot Ч} \cdot n_{0,2} + \\ + Ц_5 &= \frac{KЗ}{N \cdot C_o \cdot D \cdot Ч} \cdot n_{0,5}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sum Ц_{\text{СР.ГОД}}$ – средняя стоимость 1кВтч в рублях за год, $n_{0,3}$, $n_{0,2}$, $n_{0,5}$ указывают процент (30%, 20%, 50% в год) воздействия фиксированной скорости ветра к общему количеству времени (за 1 год).

Методы решения задачи. Выполним расчеты стоимости ВО ВЭУ на примере установки расчетной мощностью 1 кВт, геометрические размеры и масса которой были определены по источникам [17, 18].

Используя методику, изложенную в источниках [14, 16], вычислим геометрические размеры ветроэнергетической установки расчетной мощностью 1 кВт при воздействии природной скорости ветра $U = 3,25$ м/с, полученные результаты даны в табл. 1.

Дополнительные сведения: аэродинамический коэффициент лопасти $C_{\alpha} = 0,882$; количество лопастей $n = 3$; усредненная площадь лопасти при обдувании ее воздушным потоком с поворотом на 360° $S_L = 17,81$ м², ширина ветронаправляющего экрана 5 м; $R_i = 1,72$ м – расстояние от центра геометрической площади лопасти до оси вращения ветротурбины. Вид ВО ВЭУ мощностью 1 кВт представлен на рис. 2.

Таблица 1. Характеристики установки расчетной мощностью 1 кВт

Table 1. Characteristics of 1 kW wind power plant

Мощность, кВт	Размер ветротурбины		Размер поддерживающей конструкции		Размер лопасти, бххвдхх, м	Размер тора		Масса ветротурбины, кг	Ri, м
	Dm, м	Hm, м	Dy, м	Hу, м		Dn, м	dv, м		
1	4,35	21,75	14,86	25,26	0,91×1,82×4,35	4,35	2,53	1428	1,72

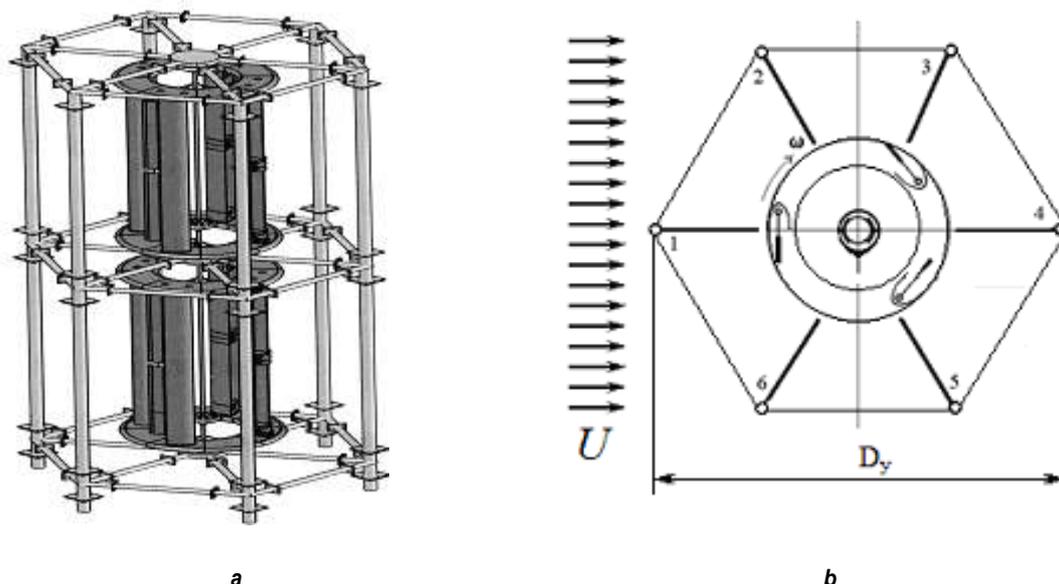


Рис. 2. Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка а – общий вид установки (ветронаправляющие экраны условно не показаны); б – план установки с ветронаправляющими экранами, обозначенными цифрами от 1 до 6

Fig. 2. Vertical axis wind power plant a – general view of the installation (wind guiding screens are conventionally not shown); b – installation plan with wind guiding screens numbered from 1 to 6

Расход материалов на ветроэнергетическую установку определялся после предварительно выполненных расчетов по прочности: ветротурбины методом конечных элементов по программе «Лира-САПР 2016» при скорости ветра $U = 20$ м/с и поддерживающей конструкции при экранах, расположенных по ее контуру (прикрывающие ветротурбину от ураганных ветров) при $U = 20$ м/с.

В табл. 2 перечислены ресурсы и прямые затраты на изготовление ветротурбины, в табл. 3 рассчитана сметная стоимость на материалы поддерживающей конструкции этажерочного типа, в табл. 4 представлена сметная стоимость на изготовление поддерживающей конструкции этажерочного типа по ГЭСН 09-03-039-05⁵.

Все материалы для изготовления ветротурбины и поддерживающей конструкции принимались по коммерческой стоимости, которая переводилась с помощью дефляторов на бюджетную стоимость октября 2019 г. Отсюда следует, что накладные расходы, сметную прибыль и налог на добавленную

стоимость принимаем только на оплату труда рабочих-монтажников, стоимость эксплуатации машин и приспособлений, оплату труда машинистов, стоимость которых составляет 74,111 тыс. руб.

Сметная стоимость ветротурбины мощностью 1 кВт и поддерживающей конструкции этажерочного типа на материалы и изготовление без мультипликатора и генератора 1543,591 тыс. руб. Система мультипликатор-генератор 100,0 тыс. руб. Общая сметная стоимость комплекта установки 1643,591 тыс. руб.

Результаты решения. Мощность установки, указанная в табл. 6, вычислена по методике, приведенной в источнике [16]. Анализ графика (рис. 3) показывает, что даже в условиях ветрового режима России возможно эффективное использование ветроэнергетики не только на прибрежных территориях и в море, но и в глубине материка, используя предлагаемую конструкцию ВО ВЭУ, методики расчета по вычислению угловой скорости вращения ветротурбины, величины вращающего момента и мощности.

⁵ГЭСН 09-03-039-05. Монтаж опорных конструкций: этажерочного типа [Электронный ресурс]. URL: https://www.defsmeta.com/rgsn/gsn_09/giesn-09-03-039-05.php (27.08.2020).

Таблица 2. Расчет прямых затрат на изготовление ветротурбины расчетной мощностью 1 кВт
Table 2. Calculation of direct costs for manufacturing of a wind turbine with the estimated capacity of 1 kW

№ п/п	Виды ресурсов	Единица измерения	Расход	Затраты в ценах на октябрь 2019 г., тыс. руб.
1	Конструкционная стеклоткань на лопасти и торы Т-10 ГОСТ 19170-2001 ⁶	м ²	1708,7	180,913
	Эпоксидная смола на всю ветротурбину ЭД-20 ГОСТ 10587-84 ⁷	кг	493,5	126,484
	Отвердитель Этал-45 на всю ветротурбину ТУ 2257-045-18826195-01 ⁸	кг	214,08	55,954
	Канат двойной свивки ТК, конструкции 6×19(1+6+12)+1 о.с., оцинкованный из проволоки марки В, Ø 4,8 мм ГОСТ 2688-80 ⁹	м.п.	130	2,638
	Осевая труба стальная бесшовная горячедеформированная Ø 102×4 l = 18 м.п. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	0,174	2,683
	Сопутствующие материалы	–	–	36,867
	ИТОГО:	–	–	405,539
2	Трудовые ресурсы	–	–	–
	Затраты труда рабочих	чел. ч	55,94	12,276
3	Машины и механизмы	–	–	–
	Кран на автомобильном ходу до 10 т	маш. ч	0,3025	0,29
	Автомобили бортовые грузоподъемностью до 5 т	маш. ч	0,5042	0,41
	ИТОГО:	–	–	12,276
	ВСЕГО:	–	–	418,515

А также используя способы регулирования угловой скорости вращения ветротурбины, вращающего момента в зависимости от среднегодовой скорости ветра местности и ее рельефа [16, 20], которые в табл. 6 и на рис. 3 не учтены, но, несомненно, повысят эффективность работы ветротурбины. Использование предлагаемой ВО ВЭУ в условиях жилой застройки возможно, так как из-за малой угловой скорости вращения ветротурбины шумовые эффекты отсутствуют. Кроме того, отметим, что на Крайнем Севере стоимость 1 кВт·ч составляет от 10 до 12 руб., а скорость ветра значительно выше 5 м/с. Следовательно, показатели, представленные в табл. 6 и на рис. 3, дают полную уверенность в том, что использование ВО ВЭУ на

территории России не только возможно, но и необходимо.

Для того чтобы определить целесообразность строительства установки, необходимо знать временное процентное соотношение ветров разной величины. К примеру, в месте строительства скорость ветра $U_{ПР} = 4$ м/с – составляет $n = 30\%$ от общего времени эксплуатации, $U_{ПР} = 5$ м/с – $n = 20\%$, $U_{ПР} = 6$ м/с – $n = 50\%$. Тогда, используя формулы (2) и данные таблицы 6, получим:

$$\begin{aligned}
 C_{\Sigma} &= C_{0,3} + C_{0,2} + C_{0,5} = \\
 &= 7,06 \cdot 0,3 + 4,22 \cdot 0,2 + 2,66 \cdot 0,5 = \\
 &= 3,69 \frac{\text{р}}{\text{кВт}} \cdot \text{ч}.
 \end{aligned}$$

⁶ГОСТ 19170-2001. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-19170-2001> (27.08.2020).

⁷ГОСТ 10587-84. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-10587-84> (29.05.2020).

⁸Отвердитель Этал-45М ТУ 2257-045-18826195-01 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sibenergo38.com/polimery/otverditel-etala-45m-tu-2257-045-18826195-01> (29.08.2020).

⁹ГОСТ 2688-80. Канат. [Электронный ресурс]. URL: https://tnmk-irk.ru/kanat-gost-2688-80?gclid=EAlalQobChMImaaLtqOf7QIVzueyCh26uADaEAAYASAAEgJ5VPD_BwE (29.08.2020).

¹⁰ГОСТ 8732-78. Труба бесшовная. [Электронный ресурс]. URL: https://tnmk-irk.ru/truba-besshovnaya?gclid=EAlalQobChMIImNGF-qOf7QIVCx7Ch1q8Q04EAAYASAAEgKKcfD_BwE (30.08.2020).



Таблица 3. Сметная стоимость на материалы поддерживающей конструкции этажерочного типа
Table 3. Estimated cost of supporting tier-type construction materials

№ п/п	Сметная стоимость на материалы поддерживающей конструкции этажерочного типа для ветротурбины мощностью 1 кВт ГЭСН 09-03-039-05 ⁵	Единица измерения	Расход	Цены на октябрь 2019 г., тыс. руб.
1	Бетон класса В20 для изготовления фундаментов ГОСТ 26633-91 ¹¹	м ³	1,8	4,382
2	Анкерные болты Ø 24 мм Тип 1.1 ГОСТ 24379.1-2012 ¹²	шт.	24	1,948
3	Наружные стойки из стальных горячедеформированных бесшовных труб Ø 194×5,5 l = 25,26 м, n = 6 шт. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	3,848	176,635
4	Внутренние стойки из стальных горячедеформированных бесшовных труб Ø 140×5 l = 25,26 м, n = 6 шт. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	2,521	113,532
5	Горизонтальные ригели из стальных горячедеформированных бесшовных труб Ø 140×5 l = 7,45 м n = 36 шт. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	4,462	200,944
6	Связи Ø 30 мм l = 12,5 м n = 12 шт. ГОСТ 8732-78 ¹⁰	т	1,422	47,351
	Установка фланцевых соединений на стальных трубах ГЭСН 16-02-007-07 ¹³	т	–	–
7	Электроды УОНИ 13/55 Ø 5 мм ГОСТ 9466-75	т	0,07	4,943
8	Болты с шестигранной головкой, с гайками и шайбами Ø 20 l = 70 мм ГОСТ Р 52644-2006 ¹⁴	шт.	280	10,705
9	Фланцы стальные плоские приварные 0,3×0,3×0,005 м 180 шт. ГОСТ 19281-2014 ¹⁵	т	0,635	21,417
10	Ветронаправляющие экраны, изготовленные из оцинкованного профнастила СКН 153-900-0,8 ¹⁶ , СТО 57398459-18-2006 ¹⁷	м ²	405	269,798
	Сопутствующие материалы 10%	–	–	78,00
	ИТОГО:	–	–	929,655

ВЫВОДЫ

1. Общая стоимость предлагаемой ВО ВЭУ расчетной мощностью 1 кВт составляет 1643,591 тыс. руб.

2. Стоимость 1 кВт·ч ВО ВЭУ зависит от срока эксплуатации и среднегодовой скорости ветра. При предполагаемом сроке эксплуатации, указанном в табл. 6, цена 1 кВт·ч:

для скорости ветра 4 м/с составляет 7,12 руб/кВт·ч; при скорости ветра 8 м/с соответствует 2,19 руб/кВт·ч. По данным табл. 6, очевидно, что при природных скоростях ветра в пределах от 5 м/с до 11 м/с (в диапазоне, где работают традиционные ветроэнергетические установки) при равных промежутках времени воздействия средняя стоимость

¹¹ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9052221> (29.08.2020).

¹²ГОСТ 24379.1-2012 Болты фундаментные. Конструкция и размеры [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200097393> (29.08.2020).

¹³ГЭСН 16-02-007-07. Установка фланцевых соединений на стальных трубопроводах диаметром: 200 мм [Электронный ресурс]. URL: https://www.defsmeta.com/rgsn/gsn_16/giesn-16-02-007-07.php (29.08.2020).

¹⁴ГОСТ Р 52644-2006 (ИСО 7411:1984). Болты высокопрочные с шестигранной головкой с увеличенным размером под ключ для металлических конструкций. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200051504> (23.08.2020).

¹⁵ГОСТ 19281-2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200113779> (23.08.2020).

¹⁶СКН 153-900-0,8. Оцинкованный профнастил СКН 153 с полезной шириной 900 мм производится из оцинкованной стальной заготовки толщиной 0,8 мм [Электронный ресурс]. URL: <http://www.proflist.ru/products/7/46/> (23.08.2020).

¹⁷СТО 57398459-30-2008 (СТП/ПП/30). Профили стальные листовые гнутые для сталебетонных перекрытий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.proflist.ru/techinfo/> (24.08.2020).

Таблица 4. Сметная стоимость на изготовление поддерживающей конструкции этажерочного типа по ГЭСН 09-03-039-05⁵

Table 4. Estimated cost for manufacturing of the tier-type supporting structure according to GESN (State unit estimate standards for construction work) 09-03-039-05⁵

№ п/п	Сметная стоимость на изготовление поддерживающей конструкции этажерочного типа для ветротурбины мощностью 1 кВт, ГЭСН 09-03-039-05 ⁵	Единица измерения	Расход	Цена на октябрь 2019 г., тыс. руб.
1	Бурение скважин на базе автомобилей (ГЭСН 05-01-056-03 ¹⁸) Ø 0,5 м / =1.5× 6 =9 м	маш. ч	0,64	8,317
2	Бетонный автомиксер 58146Т КАМАЗ 43118-3017-46 ¹⁹	маш. ч	1,8	3,474
3	Затраты труда рабочих. Разряд 4,8	чел. ч	1,93	3,632
	ИТОГО:	–	–	15,423
4	Эксплуатация крана на автомобильном ходу до 10 т	маш. ч	0,12	0,252
5	Аппарат для газовой сварки и резки	маш. ч	2,24	0,050
6	Эксплуатация бортовых автомобилей грузоподъемностью до 5 т	маш. ч	0,19	0,309
7	Затраты труда рабочих монтажников. Разряд 3,8	чел. ч	19,38	3,53
	ИТОГО:	–	–	4,141
	Монтаж ветронаправляющих экранов ГЭСН 09-04-006-02	–	–	–
8	Эксплуатация крана на автомобильном ходу до 10 т	маш. ч	0,34	0,713
9	Эксплуатация бортовых автомобилей грузоподъемностью до 5 т	маш. ч	0,5	0,817
10	Дрели электрические	маш. ч	2,41	0,088
11	Аппарат для газовой сварки и резки	маш. ч	3,36	0,0756
12	Преобразователи сварочные	маш. ч	0,18	0,0415
13	Затраты труда рабочих монтажников, разряд 3,5	чел. ч	105,3	52,812
	ИТОГО:			54,547
	ВСЕГО (на изготовление ветротурбины, поддерживающей конструкции этажерочного типа и монтаж ветронаправляющих экранов):			74,111

1 кВт·ч будет в пределах 3,14 руб/кВт·ч, при скорости ветра от 2 до 15 м/с составит 8,15 руб/кВт·ч.

3. Предлагаемая конструкция ВО ВЭУ способна работать в широком диапазоне природных скоростей ветра, в том числе и

при малых скоростях ветра от 1 до 15 м/с, что позволяет ей работать более эффективно в ветровых условиях малых среднегодовых скоростей ветра, используя рельеф местности и особенности городской застройки.

Таблица 5. Определение накладных расходов, сметной прибыли и налога на добавленную стоимость на изготовление ветротурбины, поддерживающей конструкции этажерочного типа и монтаж ветронаправляющих экранов

Table 5. Determination of overhead costs, estimated profit and value-added tax of manufacturing of a wind turbine supporting tier structures and wind guiding screen installation

Вид дополнительных начислений на изготовление ветротурбины и поддерживающей конструкции этажерочного типа и монтаж ветронаправляющих экранов	Цена, тыс. руб.
Накладные расходы определены по ставке 108×0,85=91,8%: 74,111×0,918=68,034 тыс. руб.	68,034
Сметная прибыль определена по ставке 65×0,8=52%: 74,111×0,52=38,54 тыс. руб.	38,54
Налог на добавленную стоимость определен 20% от сметной стоимости работ: 74,111×0,2=14,82 тыс. руб.	14,82
ИТОГО:	121,394

¹⁸ГЭСН 05-01-056-03. Бурение скважин диаметром 500 мм вращательным (роторным) способом в грунтах и породах группы: 3 [Электронный ресурс]. URL: https://www.defsmeta.com/rgsn/gsn_05/giesn-05-01-056-03.php (25.08.2020).

¹⁹Автобетоносмеситель 58146Т на шасси КАМАЗ-43118-3017-46 [Электронный ресурс]. URL: <https://td-ka.ru/abs-58146/58146T/> (25.08.2020).



Таблица 6. Определение стоимости 1 кВт·ч вертикально-осевых ветроэнергетических установок в зависимости от срока эксплуатации и их производительности

Table 6. Determination of the cost of 1 kWh of vertical axis wind turbines depending on their service life and efficiency

Средняя скорость ветра U , м/с	Ширина экрана, м	N , кВт	Стоимость, руб/кВт·ч	Срок эксплуатации, лет	КИЭВ*
1	5,00	0,0294	318,92	20	0,847
2	5,00	0,235	44,29	18	0,847
3	5,00	0,794	14,76	16	0,847
3,25	5,00	1,010	11,61	15	0,847
4	5,00	1,883	7,12	14	0,847
5	5,00	3,677	4,25	12	0,847
6	5,00	6,354	2,68	11	0,847
7	4,65	8,092	2,32	10	0,679
8	4,29	9,519	2,19	9	0,535
9	3,58	7,883	2,97	8	0,311
10	3,23	7,909	3,39	7	0,228
11	2,87	7,424	4,21	6	0,161
12	0	6,494	5,78	5	0,108
13	0	8,257	5,68	4	0,108
14	0	10,313	6,06	3	0,108
15	0	12,684	7,40	2	0,108

*КИЭВ – коэффициент использования энергии ветра.

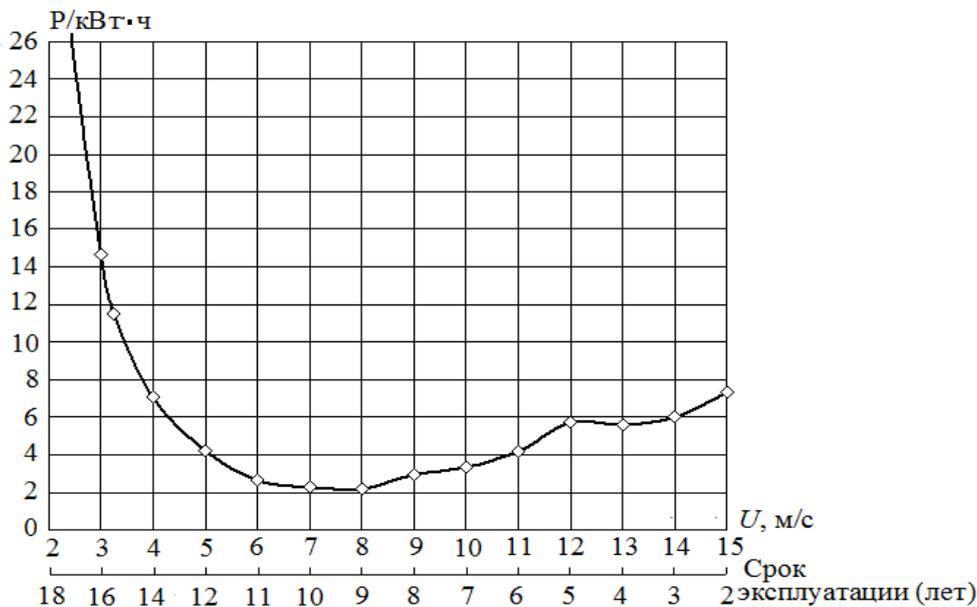


Рис. 3. Стоимость 1 кВт·ч вертикально-осевой ветроэнергетической установки расчетной мощностью 1кВт в зависимости от среднегодовой скорости ветра и срока эксплуатации

Fig. 3. Cost of 1 kW-h of vertical axis wind power plant with the estimated capacity of 1 kW depending on the average annual wind speed and service life

4. При скорости ветра более 15 м/с ветронаправляющие экраны прикрывают ветротурбину, предотвращая ее разрушение.

5. Некоторое завышение стоимости 1 кВт·ч при скорости ветра более 8 м/с связано с неэффективной работой ветронаправляющих экранов и обтеканием ветротурбины воздушным потоком при быстром ее вращении.

6. Применение перспективных разработок, изложенных в источниках [16, 19, 20],

позволит регулировать угловую скорость вращения ветротурбины, вращающий момент и мощность, а наличие двухъярусной ветротурбины (см. рис. 2) позволит вращаться ее частям разнонаправленно, что значительно повысит эффективность ее работы в зависимости от изменения природной скорости ветра.

7. Использование облегченной лопасти с изменяющимися размерами [20] будет спо-

способствовать эффективному ее использованию в условиях изменяющегося положения лопастей в объеме ветротурбины, что дополнительно снизит стоимость 1 кВт·ч.

8. Коэффициент использования энергии ветра в диапазоне ветров от 1 до 9 м/с находится в пределах от 0,847 до 0,311, что указывает на эффективную работу представленной ВО ВЭУ в условиях ветрового режима России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетная мощность 1 кВт была получена при скорости ветра 3,25 м/с, а стоимость представленной ВО ВЭУ была определена расчетом по прочности при скорости ветра 20 м/с и с учетом этого составила 1643,591 тыс.

руб. Это позволило определить стоимость 1кВт·ч, которая зависит от срока эксплуатации и среднегодовой скорости ветра. При скорости ветра 4 м/с стоимость составляет 7,12 руб/кВт·ч; при скорости ветра 8 м/с соответствует 2,19 руб/кВт·ч. При скоростях ветра от 5 м/с до 11 м/с при равных промежутках времени воздействия средняя стоимость 1 кВт·ч будет в пределах 3,14 руб/кВт·ч.

Таким образом, подтверждено эффективное использование предлагаемой ВО ВЭУ в условиях малых природных скоростей ветра на территории России, которая вполне конкурентоспособна в сравнении с традиционными способами выработки энергии, особенно в отдаленных поселках и производствах.

Список литературы

1. Driss Z., Mlayeh O., Driss S., Maaloul M., Abid M. S. Study of a small incurved savonius wind rotor: experimental validation // International Journal of Mechanics and Applications. 2015. Vol. 5. № 2. С. 31–36. <https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20150502.01>
2. Wahyudi B., Soeparman S., Hoesijmakers H.W.M. Optimization design of Savonius diffuser blade with moving deflector for hydrokinetic cross flow turbine rotor // Energy Procedia. 2015. № 68. С. 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.253>
3. Driss Z., Mlayeh O., Driss S., Maaloul M., Abid M.S. Numerical study of an unconventional Savonius wind rotor with a 75° bucket arc angle // American Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 3. No. 3A. P. 15–21. <https://doi.org/10.12691/ajme-3-3A-3>
4. Tian Wenlong, Song Baowei, Van Zwieten J.H., Pyakurel P. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes // Energies. 2015. Vol. 8. No. 8. P. 7915–7929. <https://doi.org/10.3390/en8087915>
5. Al-Faruk A., Sharifian A. Geometrical optimization of a swirling Savonius wind turbine using an open jet wind tunnel // Alexandria Engineering Journal. 2016. Vol. 55. Issue 3. P. 2055–2064. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.005>
6. Kludzinska K., Tesch K., Doerffer P. Investigation of the aerodynamics of an innovative vertical-axis wind turbine // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 530. No. 4. P. 739–754. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/530/1/012007>
7. Моды Ф. Характеристики ветродвигателя Савониуса // Современное машиностроение. 1989. № 10. С. 139–148.
8. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии / пер. с англ. Под ред. В.А. Коробкова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 392 с.
9. Горелов Д.Н. Экспериментальное исследование энергетических характеристик двухъярусного ротора Савониуса // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 4. С. 693–696.
10. Стребков, Д.С., Харитонов В.П., Муругов В.П., Сокольский А.К. Ветроэнергетика России // Сельский механизатор. 1996. № 2. С. 21–22.
11. Редчиц Д.А. Аэродинамика трехлопастного ротора Савониуса // Вестник двигателестроения. 2009. № 3. С. 71–76.
12. Поляков П.Ю., Васильчук Д.Ф. Экспериментальное исследование и разработка математической модели ветродвигателя с вертикальной осью вращения // Альтернативная энергия и экология. 2008. № 9. С. 53–58.
13. Сабинин Г.Х. Теория идеального ветряка // Труды Центрального АэроГидродинамического Института. Вып. 32. М.: Типо-Литография В.Т.У. им. Т. Дунаева, 1927. 27 с.
14. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. М.: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.
15. Хозяинов Б.П. Пути достижения лидерства в ветроэнергетике // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 22-24. С. 59–67. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.059-067>
16. Хозяинов Б.П. Экспериментальные и аналитические исследования вертикально-осевой ветроэнергетической установки // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 22-24. С. 51–58. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.051-058>
17. Хозяинов Б.П. Анализ влияния массы вертикально-осевой ветротурбины на эффективность ее работы // Промышленная энергетика. 2020. № 2. С. 60–65. <https://doi.org/10.34831/EP.2020.99.69.008>
18. Хозяинов Б.П. Влияние геометрических параметров на эффективность работы вертикально-осевой ветроэнергетической установки // Промышленная энергетика. 2020. № 1. С. 44–50.



<https://doi.org/10.34831/EP.2020.39.11.008>

19. Пат. № 2502893, Российская Федерация, МПК F03D 3/04. Способ регулирования величины вращающего момента, угловой скорости вращения вертикально-осевой ветротурбины / Б.П. Хозяинов, Д.Б. Хозяинов, М.Б. Лобанова. № 2012137350; заявитель и правообладатель Б.П. Хозяинов. Заявл. 31.08.2012;

опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36.

20. Пат. 2722792, Российская Федерация, МПК F03D 3/00. Ветротурбина с воздухоносущими конструкциями и изменяющимися габаритами лопастей / Б.П. Хозяинов, Д.Б. Хозяинов, М.Б. Лобанова; заявитель и правообладатель Б.П. Хозяинов. № 2019129662. Заявл. 19.09.2019; опубл. 03.06.2020. Бюл. № 16.

References

1. Driss Z, Mlayah O, Driss S, Maaloul M, Abid M. S. Study of a small incurved Savonius wind rotor: experimental validation. *International Journal of Mechanics and Applications*. 2015;5(2):31–36.
2. Wahyudi B, Soeparman S, Hoesjmakers HWM. Optimization design of Savonius diffuser blade with moving deflector for hydrokinetic cross flow turbine rotor. *Energy Procedia*. 2015;68:244–253. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.253>
3. Driss Z, Mlayeh O, Driss S, Maaloul M, Abid MS. Numerical study of an unconventional Savonius wind rotor with a 75° bucket arc angle. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2015;3(3A):15–21. <https://doi.org/10.12691/ajme-3-3A-3>
4. Tian Wenlong, Song Baowei, Van Zwieten JH, Pyakurel P. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes. *Energies*. 2015;8(8):7915–7929. <https://doi.org/10.3390/en8087915>
5. Al-Faruk A, Sharifian A. Geometrical optimization of a swirling Savonius wind turbine using an open jet wind tunnel. *Alexandria Engineering Journal*. 2016;55(3):2055–2064. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.005>
6. Kludzinska K, Tesch K, Doerffer P. Investigation of the aerodynamics of an innovative vertical-axis wind turbine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014;530(4):739–754. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/530/1/012007>
7. Modi F. Characteristics of Savonius wind turbine. *Sovremennoe mashinostroenie*. 1989;10:139–148. (In Russ.)
8. Twidell Dzh, Weir A. Renewable energy sources, 1990, 392 p. (Russ. ed.: *Vozobnovlyаемые istochniki energii*. Moscow, Energoatomizdat, 1990, 392 p.)
9. Gorelov DN. Experimental study of power characteristics of two-tier Savonius rotor. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics*. 2005;12(4):693–696.
10. Strebkov DS, Haritonov VP, Murugov VP, Sokol'skij AK. Russian wind power engineering. *Selskiy Mehanizator*. 1996;2:21–22. (In Russ.)
11. Redchic DA. Aerodynamics of Savonius three-bladed

rotor. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2009;3:71–76.

12. Polyakov PYu, Vasil'chuk DF. Experimental study and development of a mathematical model of a wind turbine with a vertical axis of rotation. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2008;9:53–58. (In Russ.)
13. Sabinin GH. The theory of ideal wind turbine. *Trudy Central'nogo AeroGidrodinamicheskogo Instituta = Proceedings of Central Aerohydrodynamic Institute*. Issue 32. Moscow: Tipo-Litografiya V.T.U. imeni T. Dunaeva; 1927, 27 p. (In Russ.)
14. Shefter Yal. Using wind energy. Moscow: Energoatomizdat; 1983, 200 p. (In Russ.)
15. Khozyainov BP. The ways to achieve leadership in wind energy. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2018;(22-24):59–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.059-067>
16. Khozyainov BP. Experimental and analytical studies of vertical axis wind turbines. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2018;(22-24):51–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.22-24.051-058>
17. Hozyainov BP. Analysis of the effect of vertical axis wind turbine weight on turbine operation efficiency. *Promyshlennaya energetika*. 2020;2:60–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.34831/EP.2020.99.69.008>
18. Hozyainov BP. Influence of geometric parameters on vertical axis wind turbine efficiency. *Promyshlennaya energetika*. 2020;1:44–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.34831/EP.2020.39.11.008>
19. Hozyainov BP, Hozyainov DB, Lobanova MB. Control method of the magnitude of vertical axis wind turbine torque and angular rotation speed. Patent RF, no. 2502893; 2013. (In Russ.)
20. Hozyainov BP, Hozyainov DB, Lobanova MB. Wind turbine with air-carrying structures and variable dimensions of blades. Patent RF, no. 2722792; 2020. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Хозяинов Борис Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры строительных конструкций,
водоснабжения и водоотведения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия;
✉ e-mail: khozyainov-bp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris P. Khozyainov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Building
Structures, Water Supply and Sanitation,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650000, Russia;
✉ e-mail: khozyainov-bp@mail.ru

Свистунова Татьяна Николаевна,
кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры производственного менеджмента,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия;
e-mail: svtnick2007@rambler.ru

Tatyana N. Svistunova,
Cand. Sci. (Economics), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Production
Management,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650000, Russia;
e-mail: svtnick2007@rambler.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 conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.09.2020; одобрена после рецензирования 04.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 24.09.2020; approved after reviewing 04.11.2020; accepted for publication 18.12.2020.



Компактирование порошковых материалов импульсным давлением, создаваемым плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника

© Л.М. Чеботнягин, В.В. Потапов, Н.А. Иванов, Н.Н. Иванчик

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследование возможности компактирования порошковых материалов импульсом давления электрического взрыва проводника, установление функциональной связи между параметрами импульса давления и параметрами электротехнологической установки для компактирования порошковых материалов, выбор параметров для регулирования амплитуды и длительности импульсного давления, а также выбор конструктивных параметров рабочего инструмента для компактирования порошковых материалов. На основе метода формализованного представления развития процесса формирования и распространения импульсной волны давления, создаваемой расширяющимся плазменным каналом электрической искры в передающей среде, которая инициирована электрическим взрывом проводника, проведены аналитические исследования. Моделирование скоростного деформирования стенки трубы под действием импульсного давления проводилось в программном комплексе MATLAB, исследование микроструктуры слома скомпактированного материала с наномодификаторами – на сканирующем электронном микроскопе. На основе проведенных экспериментальных исследований по компактированию порошковых материалов импульсным давлением, созданного расширяющимся плазменным каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника при подаче на него импульса тока от электротехнологической установки, установлено, что на величину и форму импульса давления максимально влияют параметры данной установки. Исходя из полученных модельных исследований, выбраны оптимальные режимы для компактирования порошков с наномодификаторами. Получена взаимосвязь между параметрами импульсного давления (амплитуды P_m и формы распространения волны давления) и параметрами электротехнологической установки (напряжение, индуктивность, емкость). Предложено использовать акусто-электроволновую модель для оценки давления, обеспечивающего скоростное деформирование металлических труб, и построения профиля деформирования металлических труб, используемых для компактирования. Анализ SEM изображений разлома, полученных в экспериментах компактов, показали высокую степень уплотнения частиц с образованием объемного композита.

Ключевые слова: электрическая искра, плазменный канал, электрический взрыв проводников, импульсное давление, компактирование, наномодификаторы

Для цитирования: Чеботнягин Л.М., Потапов В.В., Иванов Н.А., Иванчик Н.Н. Компактирование порошковых материалов импульсным давлением, создаваемым плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1297–1310. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1297-1310>

Compacting nanopowder materials by a pulse pressure generated by expanding plasma channel of a spark ignited by wire electrical explosion

Leonid M. Chebotnyagin, Vasiliy V. Potapov, Nikolay A. Ivanov, Nikolay N. Ivanchik

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to explore the possibilities of powder material compaction by the pressure pulse of an electric explosion of a conductor, establish a functional relationship between the parameters of the pressure pulse and an electrical technological installation for powder material compaction, select the parameters for pulse pressure amplitude and duration adjustment, and specify the design options of the working tool for powder material compaction. Analytical studies have been carried out on the basis of the method of formalized representation of the development of the process of pulse pressure wave formation and propagation where the latter is created by an expanding plasma channel of an electric spark in a transmitting medium initiated by an electric explosion of a wire. The simulation of high-speed de-

formation of the pipe wall under the action of the pulse pressure is carried out in the MATLAB software package. A scanning electron microscope is used to study the microstructure of the breakage of the compacted material with nanomodifiers. Based on the experimental studies on powder material compaction by the pulse pressure created by the expanding plasma channel of a spark initiated by an electric explosion of a wire when the current pulse from an electrotechnological installation is supplied to it, it has been determined that the magnitude and shape of the pressure pulse are most influenced by the parameters of this installation. Based on the obtained model studies, the optimal modes for compaction of nanomodified powders have been selected. The relationship is obtained between the parameters of the pulse pressure (P_m amplitude and pressure wave propagation form) and the electrotechnological installation (voltage, inductance, capacitance). It is proposed to use an acoustic-electric wave model to estimate the pressure that provides high-speed deformation of metal pipes, and to plot a deformation profile of metal pipes used for compaction. Analysis of SEM images of the fractures obtained in compact experiments has showed a high degree of particle compaction with the formation of a solid composite.

Keywords: electric spark, plasma channel, electrical explosion of a wire, pulse pressure, compaction, nanomodifiers

For citation: Chebotnyagin LM, Potapov VV, Ivanov NA, Ivanchik NN. Compacting nanopowder materials by a pulse pressure generated by expanding plasma channel of a spark ignited by wire electrical explosion. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6): 1297–1310. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1297-1310>

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проявляется большой интерес к исследованиям в области материаловедения, связанных с компактированием гетерогенных сред. Область включает в себя решение задач, связанных с созданием композитов из металлических и неметаллических порошков. Интерес к решению этих задач связан с разработкой материалов с уникальными свойствами. При этом в [1] показано, что технологии, основанные на традиционном горячем прессовании, не обеспечивают необходимого давления для формирования однородного композита. Одним из эффективных методов в данной области является взрывное компактирование порошковых материалов ударной волной. Как показывают исследования [2–4], применение взрывного компактирования позволяет сохранять и совершенствовать исходную структуру и свойства компонентов нанопорошков при кратковременном воздействии на них высоких давлений. Например, позволяет получать заготовки с более высокой плотностью.

В основном в качестве источника импульсных давлений используют взрывчатые вещества (ВВ). Однако применение ВВ имеет ряд ограничений, например, требуется соблюдение определенных мер безопасности и условий хранения, с экологической точки зрения они представляют угрозу окружающей среде [5–7].

Свободен от указанных недостатков ди-

намический метод компактирования, основанный на применении импульсного давления, создаваемого плазменным расширяющимся каналом искры, электрического взрыва проводника (ЭВП) [8].

Целью работы является определение функциональной связи параметров импульсов давления с параметрами разрядного контура генератора импульсов тока электротехнологической установки для компактирования порошковых материалов, выбор параметров для регулирования амплитуды и длительности импульсного давления, а также выбор конструктивных параметров рабочего инструмента для компактирования порошковых материалов.

СХЕМА РАБОТЫ

Упрощенная схема установки для компактирования порошковых материалов с использованием импульсного давления, создаваемого плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой ЭВП, изображена на рис. 1.

После срабатывания искрового коммутатора (К) происходит разряд батареи высоковольтных конденсаторов (С) на тонкую проволочку, помещенную в полиэтиленовый пенал осесимметричной конструкции, заполненный передающей средой (водой). Заполненный водой пенал с проволочкой получил название электровзрывного картриджа. Электровзрывной картридж (1), в свою оче-

редь, помещен в тонкостенную металлическую трубу. При разряде формируется импульс тока с амплитудой до 100 кА и длительностью от единиц до десятков микросекунд. При таких параметрах тока происходит электрический взрыв проводника, инициирующий искру в воде. Плазменный расширяющийся канал искры формирует импульс давления в передающей среде. Импульс давления воздействует на внутреннюю поверхность трубы и вызывает ее высокоскоростное деформирование.

Величина деформации и скорость деформирования стенки трубы зависят от формы импульса, величины давления и свойств деформируемого материала. При компактировании стенка трубы выполняет функцию поршня, который осуществляет прессование порошкового материала.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ С ПАРАМЕТРАМИ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ ТОКА

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Амплитуда и длительность волны импульсного давления определяются законом выделения энергии в искровом канале электровзрывного картриджа электротехнологической установки и связаны со скоростью нарастания мощности (N') [8–14]. Скорость

нарастания мощности зависит от параметров разрядного контура, определяющего режим разряда.

Амплитуда импульса давления P , с учетом закона энерговыделения в плазменном канале искры, определяется формулой [8–10]:

$$P = AE(t) \left[\int_0^t E^{\frac{1}{2}}(t) dt \right]^{-1}, \quad (1)$$

где A – постоянная, зависящая от плотности и вязкости передающей среды;

$$E(t) = \int_0^t N(t) dt = \int_0^t i^2(t) R_{ch}(t) dt, \quad (2)$$

где $E(t)$ – энергия, выделившаяся в плазменном канале; N – мощность выделения энергии в канале; $i(t)$ – разрядный ток; R_{ch} – сопротивление плазменного канала.

Типичная осциллограмма тока $i(t)$ (рис. 2) представляет собой быстро затухающую синусоиду. График мощности $N(t)$ на каждом полупериоде может быть аппроксимирован треугольником (рис. 3). Энергия на интервале времени $t < \frac{T}{4}$, с учетом формулы (2), $E(t)$ может быть представлена в виде:

$$E(t) = \frac{N' \cdot t^2}{2}. \quad (3)$$

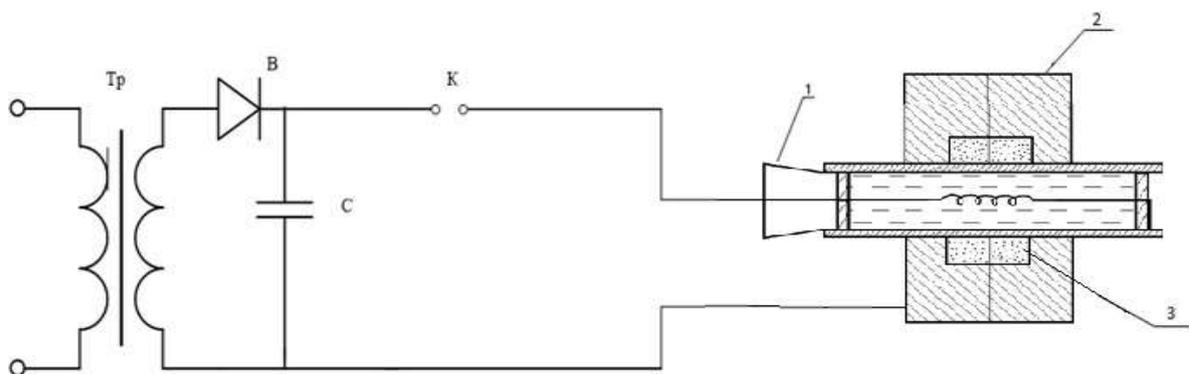


Рис. 1. Схема электротехнологической установки для компактирования порошковых материалов:

Тр – высоковольтный зарядный трансформатор, В – высоковольтный выпрямитель, С – ударная емкость, К – коммутатор (искровой разрядник); 1 – электровзрывной картридж, 2 – рабочий орган, 3 – компактируемый порошок

Fig. 1. Diagram of an electrical technological installation for powder material compaction: Tr – high-voltage charging transformer, B – high voltage rectifier, C – shock capacity, K – switch (spark gap switch); 1 – electro explosive cartridge, 2 – working body, 3 – compacted powder

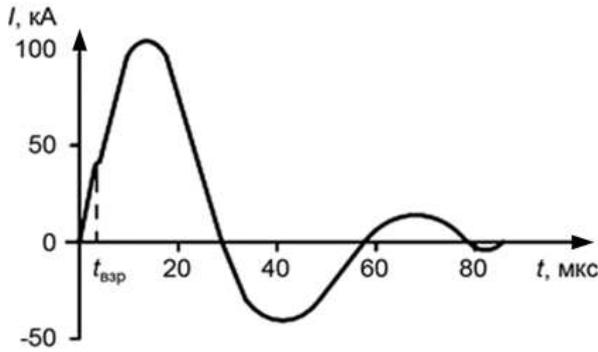


Рис. 2. Осциллограмма тока в плазменном канале.
 $t_{\text{взр}}$ – момент взрыва проводника
 Fig. 2. Current waveform in the plasma channel,
 $t_{\text{взр}}$ – the moment of wire explosion

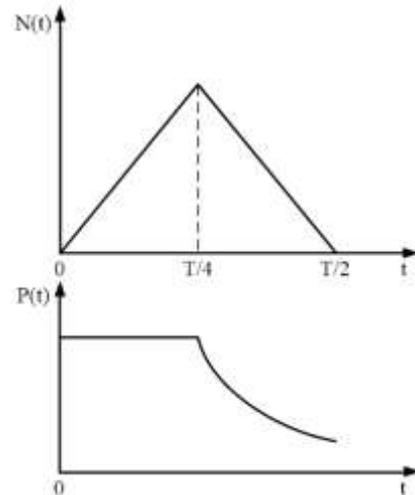


Рис. 3. Аппроксимация мощности и амплитуды импульсной волны давления
 Fig. 3. Approximation of power and amplitude of a pulse pressure wave

Тогда для амплитуды давления P_m , с учетом (1), можно записать:

$$P_m = A \cdot \frac{N' \cdot t^2}{2 \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{N'}{2}} \cdot t dt} = A \cdot \sqrt{2 \cdot N'} \quad (4)$$

При этом давление на интервале времени первой четверти периода колебания тока будет постоянным: $P_m = A \cdot \sqrt{2 \cdot N'} = const$.

Максимальная амплитуды давления будет иметь место при максимальной N' .

Согласно [9], наибольшее значение мощности при заданных E_0 , L , C имеет место при $\frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = 1,11$. Максимальное значение скорости

нарастания мощности наблюдается при $\frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = 2$, в интервале $1 \leq \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \leq 2$ значения N' близки к оптимальным значениям.

На основании предварительных экспериментов [15–18] установлено, что на величину деформации и скорость деформирования стенки трубы (т.е. движение поршня) максимально влияют параметры тока в первом полупериоде $T_{1/2}$. Принято, что давление при $t < T_{1/4}$ в режиме нарастания мощности, как установлено выше, постоянно и спадает по экспоненте на ниспадающем участке ($t > T_{1/4}$) (см. рис. 3). Для определения давления на участке уменьшения мощности, где $\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{2}$,

использована следующая формула для аппроксимации закона энерговыделения:

$$E(t) = E_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{T} \cdot t \right) \quad (4)$$

Используя (4) с учетом (1), установлены параметры волны давления на ниспадающей части тока в разряде в первом полупериоде (см. рис. 3), и получены выражения [15–18]:

$$P = P_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (5)$$

$$P_m = A \sqrt{2N'} = A \frac{U \cdot C^{1/4}}{L^{3/4}}; \quad (6)$$

$$\tau = 4,53 \cdot \sqrt{L \cdot C}, \quad (7)$$

где τ – постоянная времени уменьшения импульса давления; A – постоянная, полученная из опытов.

Для калибровки источника импульсного давления и определения эмпирической константы A , входящей в выражения (1, 6), проведены исследования по деформированию металлической трубы импульсным давлением, где в качестве источника использовали плазменный расширяющийся канал электрической искры ЭВП.

Схема экспериментальной установки представлена на (рис. 4). Параметры установки: емкость C варьировалась в интервале

9–24 мкФ, зарядное напряжение U в интервале 15–45 кВ, индуктивность разрядного контура составляла $L = 3,8$ мкГн. В качестве взрывающихся проводников использовались образцы из алюминиевой проволоки длиной 10–15 см с диаметром 0,6–0,8 мм. Образцы проволоки свертывались в спираль и размещались в полиэтиленовый тонкостенный картридж, заполненный передающей средой (водой). Картридж располагался в образцах деформируемой трубы. Использовались трубы из алюминиевого сплава марки АД 1, с

толщиной стенки 4 мм и диаметром 28 мм (28x4 мм) и латуни Л70 25x2,5 мм.

Фотосъемка осуществлялась скоростным фоторегистратором в режиме покадровой съемки, скорость съемки составляла $1,75 \times 10^6$ кадр/с.

Для иллюстраций представлены кадры скоростной фотосъемки и графики деформации металлических труб рис. 5 а, б. График движения торцевой части электровзрывного картриджа представлен на рис. 6.

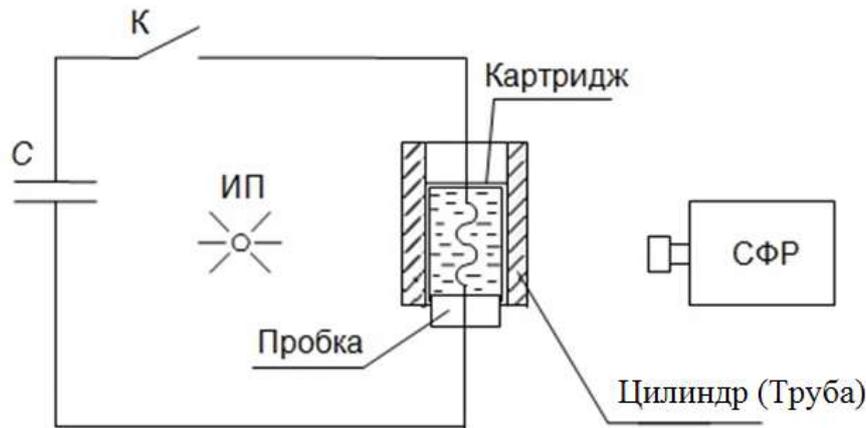


Рис. 4. Схема установки для калибровки источника импульсного давления: К – коммутатор; С – батарея конденсаторов; СФР – скоростной фоторегистратор; ИП – импульсная подсветка
Fig. 4. Installation diagram for pulse pressure source calibration: К – switch; С – capacitor bank; СФР – high-speed photographic recorder; ИП – pulse illumination

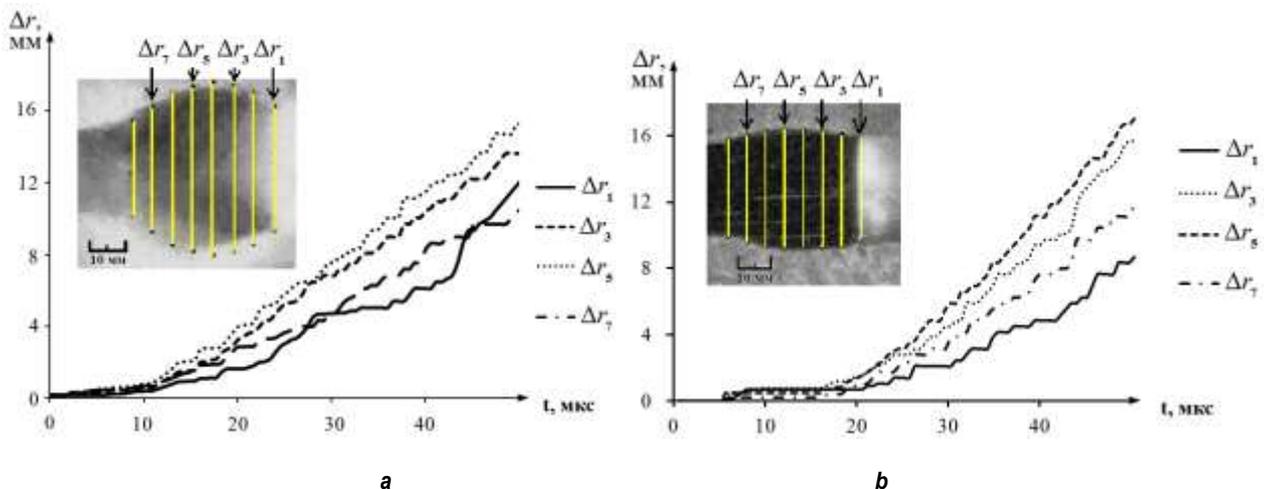


Рис. 5. Кинетика деформации труб: сверху – кадры скоростной съемки с сечениями по длине трубы $\Delta r_1, \Delta r_3, \Delta r_5, \Delta r_7$ от места контакта с металлической оснасткой; внизу – зависимость деформации от времени: а – труба из сплава АД1; б – из сплава Л70

Fig. 5. Kinetics of pipe deformation: at the top – frames of high-speed shooting with the sections along the pipe length $\Delta r_1, \Delta r_3, \Delta r_5, \Delta r_7$ from the contact point with the metal tool; below – deformation vs time dependence: а – AD1 alloy pipe; б – L70 alloy pipe

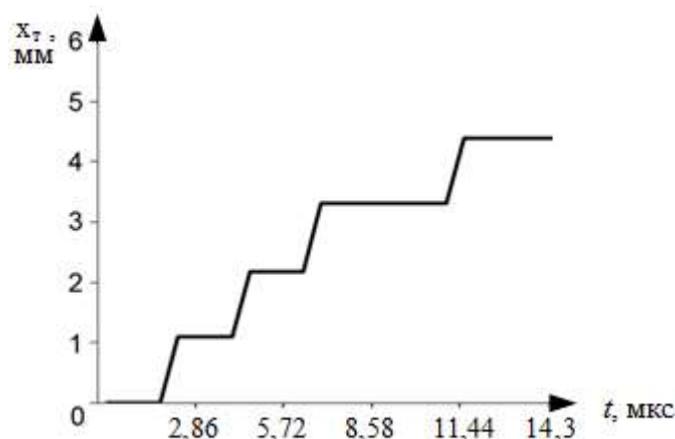


Рис. 6. Временная диаграмма движения торцевой части электровзрывного картриджа
 Fig. 6. Timing diagram of electro explosive cartridge end part movement

Скоростное деформирование металлической трубы импульсом давления плазменного расширяющегося канала искры описывается дифференциальным уравнением [7, 19]:

$$2 \cdot P(t) = m \frac{du}{dt} + u \left(\rho_0 \cdot c_0 + \frac{\eta \cdot 2h}{r^2 \sqrt{3}} \right), \quad (8)$$

где $P(t)$ – давление, воздействующее на внутреннюю стенку трубы; η – коэффициент динамической вязкости; m – плотность массы на единицу площади:

$$m = \frac{M}{S} = \rho \cdot h, \quad (9)$$

где M – масса деформируемого образца металлической трубы; S – площадь поверхности деформируемого участка; ρ – плотность материала; h и r – толщина стенки и внутренний радиус образца трубы; u – его скорость деформирования.

Движение торцевой части на основе данного уравнения (8) может быть представлено в следующем виде [6, 18]:

$$2 \cdot P(t) = u(\rho_0 \cdot c_0). \quad (10)$$

Из графика движения торцевой части выявили скорость распространения, и из уравнения (10) – амплитуду волны давления. И далее из формулы (4) определялась эмпирическая константа A , входящая в формулы (1, 6), устанавливающая связь параметров импульса давления с параметрами электротех-

нологической установки разрядного контура. В дальнейшем эти формулы использовались для регулирования и выбора режимов работы установки.

Индуктивность L разрядного контура определяется технологической петлей проводников присоединения к разрядному контуру установки. Для получения максимального давления во взрывном картридже и, следовательно, технологического эффекта, L должна быть минимальной. Таким образом, регулирование амплитуды давления может быть выполнено в основном путем изменения трех параметров, определяющих режим работы установки – это напряжение, емкость и индуктивность.

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ПОРШНЯ ДЛЯ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКА

Как показывают экспериментальные исследования по деформированию импульсным давлением металлических труб, их профиль принимает бочкообразную форму (см. рис. 5). Это свидетельствует о том, что давление, воздействующее на внутреннюю поверхность трубы, неравномерно. Причиной такой неравномерности является влияние свободных поверхностей торцевых частей электровзрывного картриджа.

Под свободной поверхностью понимается граница раздела двух сред: передающей

среды электровзрывного картриджа и воздуха в торцевых частях, деформируемой трубы. Влияние свободных поверхностей на форму профиля трубы подтверждается фотографиями скоростной съемки деформации трубы (см. рис. 5). Для ограничения влияния свободных поверхностей предложено оптимизировать конструкцию рабочей оснастки для компактирования порошковых материалов. Для оптимизации конструкции электровзрывного картриджа использована акустическая модель скоростного деформирования металлических труб импульсным давлением электрического взрыва проводника. Расчетная схема для анализа деформирования металлической трубы (или цилиндра), с учетом свободных поверхностей лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа, представлена на рис. 7. Анализ работ по исследованию подводных взрывов [7, 19] показывает, что влияние свободных поверхностей принято учитывать с помощью вторичных источников волн разряжения, которые зеркально расположены на оси картриджа относительно реального источника.

На внутреннюю поверхность деформируемой трубы в некоторую точку А, кроме падающей волны давления от реального источника, падают волны давления с обратным знаком, т.е. волны разгрузки, отраженные от границы раздела передающей среды с воздушной средой в торцевой части картриджа (см. рис. 7).

Результирующее давление в точке А определяется суперпозицией импульсов

давления от первичного и вторичного источников:

$$2 \cdot P_A(t) = 2 \cdot P(t) - 2 \cdot P_1(t) - 2 \cdot P_2(t) = 2 \cdot P(t) - [2 \cdot P(t - \tau_1) \cos \alpha_1] I(t - \tau_1) - [2 \cdot P(t - \tau_2) \cos \alpha_2] I(t - \tau_2), \quad (11)$$

где $P(t)$ – импульс давления от реального источника в радиальном направлении; $P_1(t)$ и $P_2(t)$ – импульсы давления от вторичных источников.

$$2 \cdot P_1(t) = [2 \cdot P(t - \tau_1) \cos \alpha_1] I(t - \tau_1); \quad (12)$$

$$2 \cdot P_2(t) = [2 \cdot P(t - \tau_2) \cos \alpha_2] I(t - \tau_2), \quad (13)$$

где $I(t - \tau_1) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau_1 \\ 1, & t \geq \tau_1 \end{cases}$ и

$I(t - \tau_2) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau_2 \\ 1, & t \geq \tau_2 \end{cases}$ – импульсные функции;

τ_1 и τ_2 – время запаздывания прихода $P_1(t)$ и $P_2(t)$ в точку А (см. рис. 7); 1 – единичная ступенчатая функция.

$$\tau_1 = \frac{r_1 - r_n}{c_0}; \quad (14)$$

$$\tau_2 = \frac{r_2 - r_n}{c_0}, \quad (15)$$

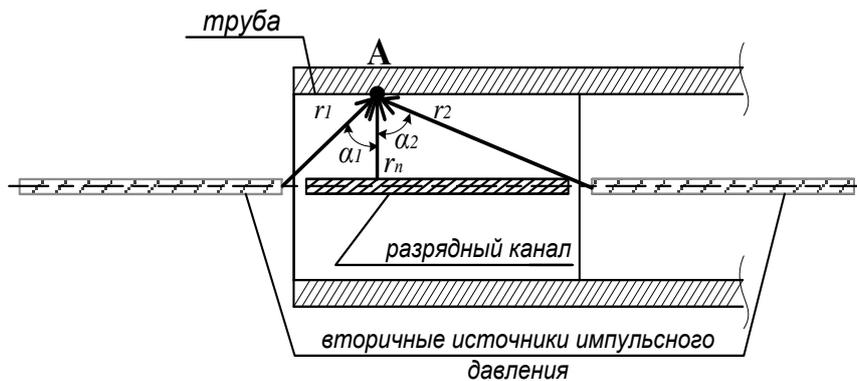


Рис. 7. Расчетная схема для оценки влияния свободных поверхностей торцевых частей электровзрывного картриджа

Fig. 7. Design scheme for assessing the effect of free surfaces of electro explosive cartridge end parts

где r_n , r_1 и r_2 – длины пробега волн давления, соответственно, от основного и вторичных источников; ρ_0 и c_0 плотность и скорость звука в воде.

АКУСТО-ЭЛЕКТРОВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования деформирования труб импульсным давлением электрического взрыва проводника использована акусто-волновая модель. В акусто-волновой модели для описания волн давления в электровзрывном картридже используется лучевое приближение и аналогия с распространением электромагнитных волн в длинных линиях. Данные допущения и аналогии позволили применить готовые программные продукты, используемые для анализа переходных процессов, в расчетах скоростного деформирования металлических труб импульсом давления электрического взрыва проводника.

Подробно акусто-волновая модель описана в [14–19].

Используя предложенные модельные представления, в программном комплексе MATLAB выполнены расчеты скоростного деформирования металлических труб импульсным давлением плазменного расширяющегося канала электрической искры для условий эксперимента, представленных в [15–20]. Результаты расчетов с использованием акусто-электроволновой модели представлены на рис. 8, где точками показаны расчетные значения для соответствующего времени t .

Сопоставление расчетных и экспериментальных профилей деформации трубы для различных моментов времени (см. рис. 8) показывает хорошее совпадение, что доказывает возможность использования предложенных модельных представлений для расчета деформирования металлических труб импульсным давлением, создаваемым расширяющим каналом электрической искры.

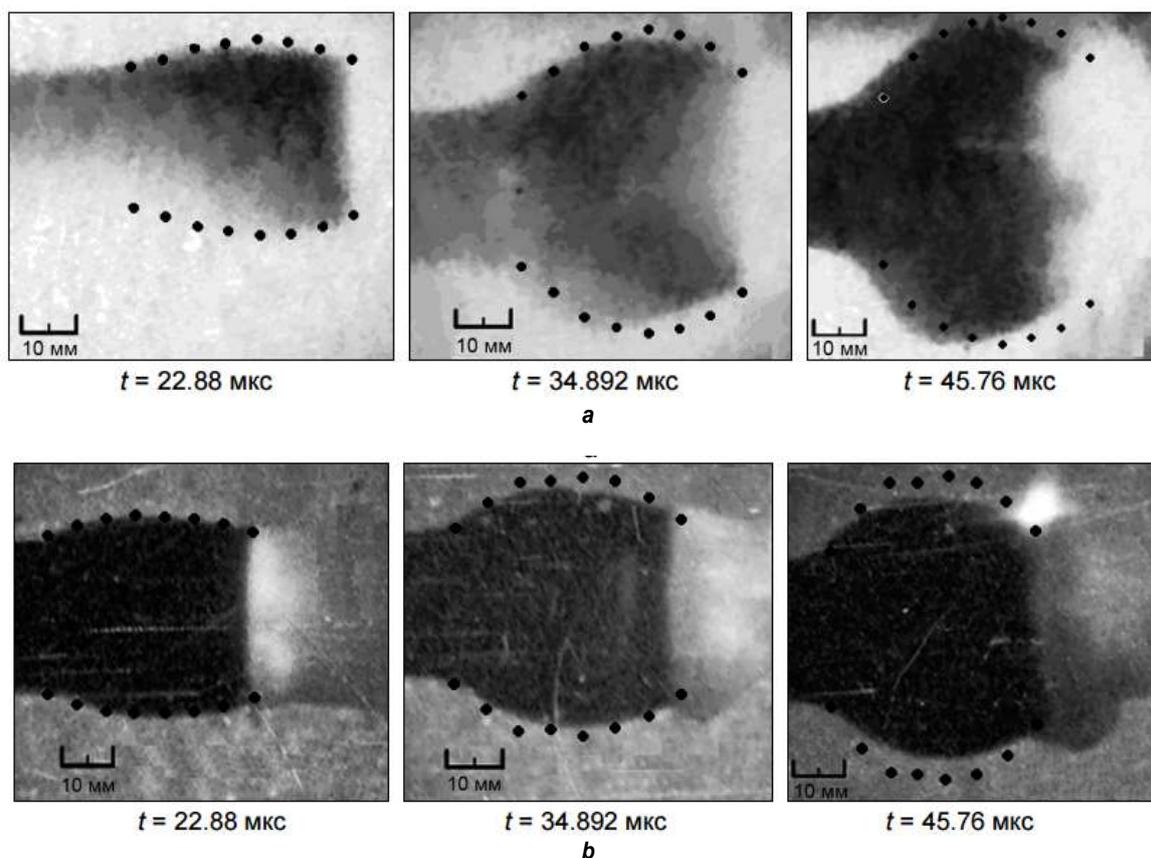


Рис. 8. Расчетные (точки) и экспериментальные скоростные снимки труб при деформировании:
а – из алюминиевого сплава АД1 (28×4 мм); б – латуни Л70 (25×2,5 мм)

Fig. 8. Calculated (points) and experimental high-speed images of pipes under deformation:
a – AD1 aluminum alloy pipe (28×4 mm); b – L70 brass pipe (25×2.5 mm)

КОНСТРУКЦИЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ КОМПАКТИРОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для компактирования разработана оснастка (рис. 9, 10), способная выдержать многократные воздействия импульсов давления, достигающих в амплитуде более 1 ГПа. Оснастка представляет собой два стальных диска, которые образуют кольцевую камеру, в которой размещается компактируемый порошок.

Диаметр стальных дисков выбран по условию исключения дезинтегрирующего воздействия ударной волны, отраженной от границы раздела цилиндрической поверхности дисков и окружающей среды (воздуха). Размеры кольцевой камеры подбирались экспериментально из условия обеспечения необходимой степени компактирования, при котором возможно внедрение наномодифи-

каторов. Для определения длины и места размещения кольцевой камеры относительно поршня выполнен расчетный эксперимент по исследованию влияния геометрических размеров торцевых частей электровзрывного картриджа на профиль деформирования, с использованием предложенной акусто-электроволновой модели. Расчет выполнен для поршня в виде алюминиевой трубы с параметрами: внешний диаметр 22 мм; внутренний диаметр 16 мм, плотность алюминия в расчетах принималась равной 2700 кг/м^3 .

Эскиз электровзрывного картриджа для исследования представлен на рис. 11. Длина деформируемого участка трубы (x) принята 40 мм и соответствует длине взрывающегося проводника. Толщины торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа в расчетах принимались равными 20 мм, 15 мм, 10 мм, 5 мм и 1 мм.

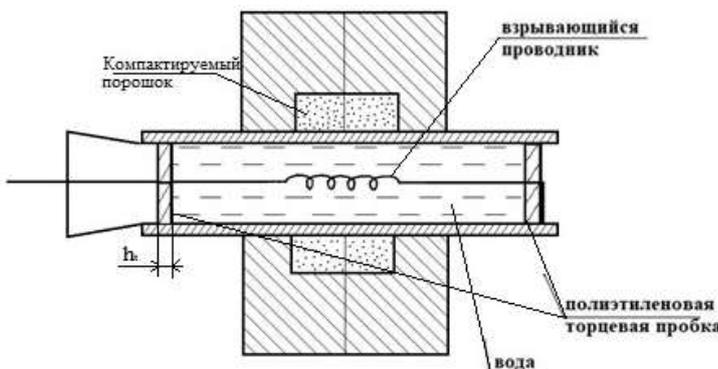


Рис. 9. Эскиз оснастки для компактирования
Fig. 9. Compaction tool sketch



Рис. 10. Фото оснастки для компактирования нанопорошков
Fig. 10. Photo of nanopowder compaction tools

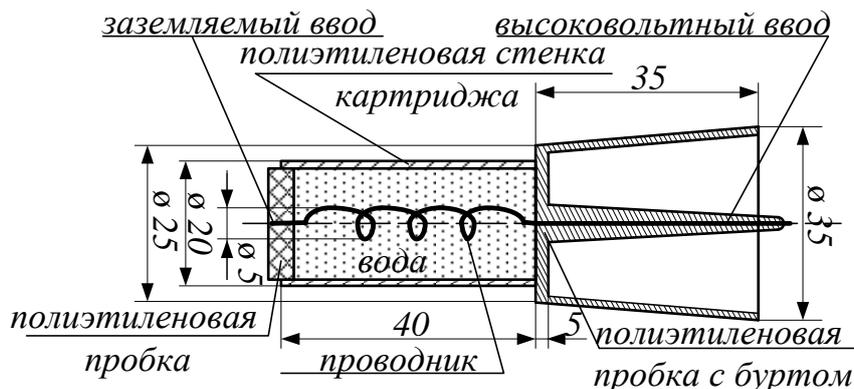


Рис. 11. Эскиз электровзрывного картриджа
Fig. 11. Sketch of the electro-explosive cartridge

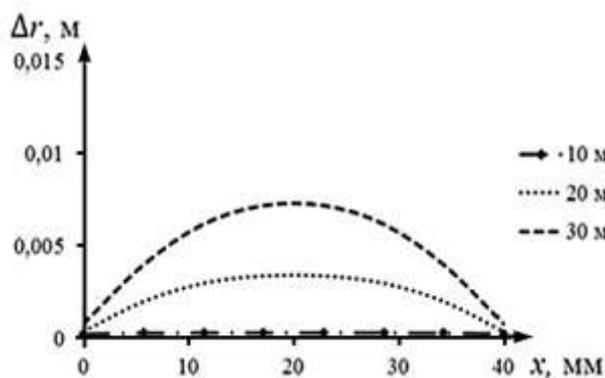
Результаты расчетов профилей труб деформирования для различных моментов времени и разных толщин h_T (2 мм и 10 мм) лобовых торцевых частей представлены на рис. 12. На этом же рисунке представлены зависимости импульсов давления, воздействующие на внутреннюю сторону металлической трубы для точек, соответствующих началу и концу кольцевой камеры оснастки.

Эпюры импульсов давления, воздействующие на внутреннюю сторону металлической трубы в концевой части кольцевой камеры, для разных толщин лобовых торцевых частей hm (2 мм и 10 мм) представлены на рис. 12 (b) и (d), соответственно.

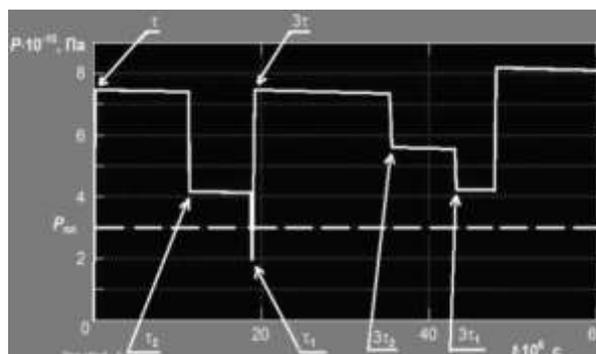
Анализ расчетных профилей показывает, что с увеличением толщины лобовых торцевых участков электровзрывного картриджа происходит выравнивание профиля. При этом зависимость давления, воздействующего на внутреннюю стенку трубы от времени, на участке расположения кольцевой камеры

с порошковым материалом становится практически постоянным. Эффект выравнивания профиля трубы с увеличением торцевых частей электровзрывного картриджа использован для конструкторского технологического регулирования давления и выбора места расположения и осевого размера кольцевой камеры с порошковым материалом.

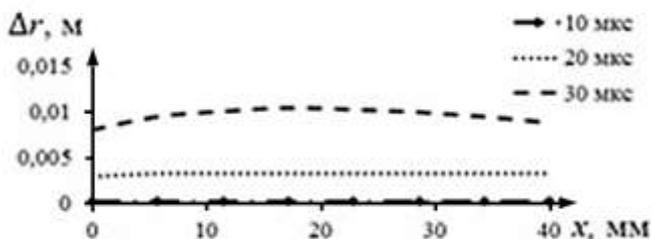
Диск с кольцевой камерой размещался в центре деформируемого профиля прессующего поршня, длина кольцевой камеры выбрана по условию постоянства давления по длине поверхности компактирующего поршня. Глубина кольцевой камеры подбиралась экспериментально, по условию степени компактирования, при котором возможно внедрение наномодификаторов. Контроль осуществлялся по SEM-изображениям, полученным на электронном микроскопе JEOL JIB 4500 (SEM от англ. Scanning Electron Microscope).



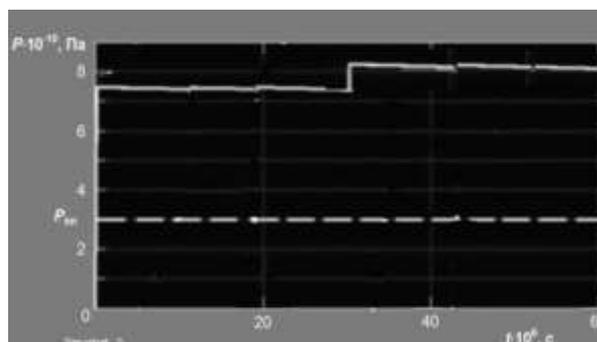
a



b



c



d

Рис. 12. Зависимости профилей деформации от толщины лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа $hm = 2$ мм (a, b) и $hm = 10$ мм (c, d)

Fig. 12. Dependencies of deformation profiles on the thickness of the frontal end parts of the electro explosive cartridge $hT = 2$ mm (a, b) $hT = 10$ mm and (c, d)



КОМПАКТИРОВАНИЕ ПОРОШКОВОГО АЛЮМИНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Для компактирования порошкового алюминия использовались образцы, полученные путем совместного помола наномодификатора, представляющие собой многостенные углеродные нанотрубки (УНТ) марки «Таунит» и порошкового алюминия марки АСП-5 и чистоты 99,5%, в планетарной мельнице PULVERISETTE 7 в течение 8 ч при 200 об/мин. Помол производился в суспензии на основе метанола. Алюминиевый порошок и модификатор помещали в сосуды из твердосплавного карбида вольфрама, содержащие шары из того же материала в весовом соотношении (масса шаров к массе порошка) 10:1. Данные параметры выбраны для того, чтобы равномерно распределить УНТ в объеме материала и внедрить их в матрицу алюминия.

Для получения компакта таким методом использовались образцы с содержанием 1%, 1,5%, 2% наномодификатора. Получившиеся компакты раскалывались на куски для исследования места слома на сканирующем электронном микроскопе.

На рис. 13 и 14 представлены SEM-изображения структуры в месте слома компакта с 1%-м содержанием наномодификатора.

К сожалению, разрешение микроскопа не позволило на данных снимках идентифицировать включения нанометровых объектов. Однако влияние наномодификатора обнаруживалось на изменениях кристаллической

микроструктуры композита.

На рис. 15 и 16 изображены SEM-фотографии структуры полученных компактов с содержанием 1,5% и 2% наномодификатора. Как видно из рисунков, при увеличении содержания наномодификатора до 2% происходит изменение микроструктуры алюминия, в месте слома наблюдается слоистая структура, указывающая на формирование отдельных фаз микрокристаллитов металла. Формирование объемного композита происходит при оптимальной концентрации наномодификатора 1,5%, как видно из рис. 15. На изображении не проявляются частицы порошка алюминия, что подтверждает высокий эффект компактирования при импульсном давлении.

Образец с содержанием 1,5% модификаторов имел степень компактирования порошкового материала не ниже, чем степень компактирования ударно-волновым методом [2–4] с использованием взрывчатых веществ. Степень компактирования полученных образцов по плотности близка к 100% от металлического алюминия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы выполнены исследования источника импульсного давления, создаваемого плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника, с регулируемыми параметрами импульса. Такой метод

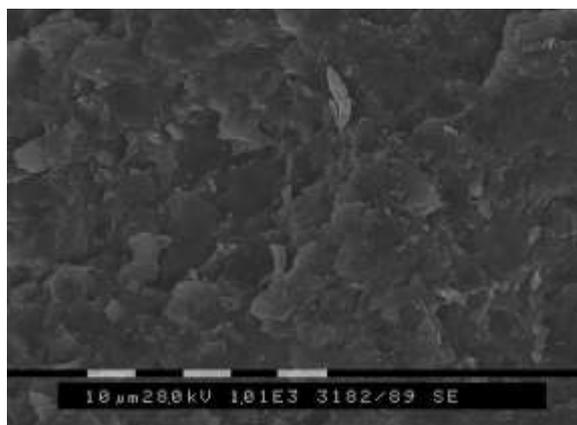


Рис. 13. SEM-изображение структуры алюминия с содержанием 1% наномодификатора
Fig. 13. SEM image of the aluminum structure with 1% nanomodifier content

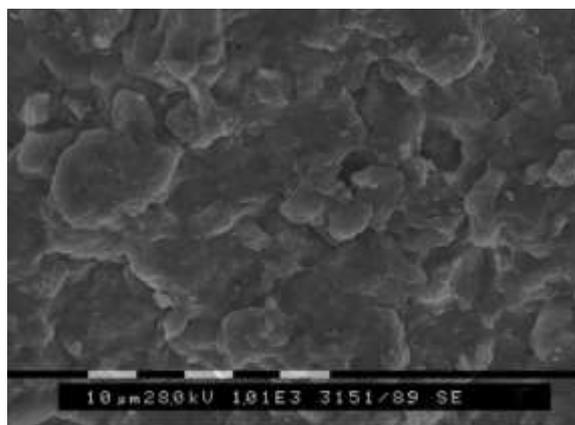


Рис. 14. SEM-изображение структуры алюминия с включением 1% наномодификатора
Fig. 14. SEM image of the aluminum structure with the inclusion of 1% of nanomodifier

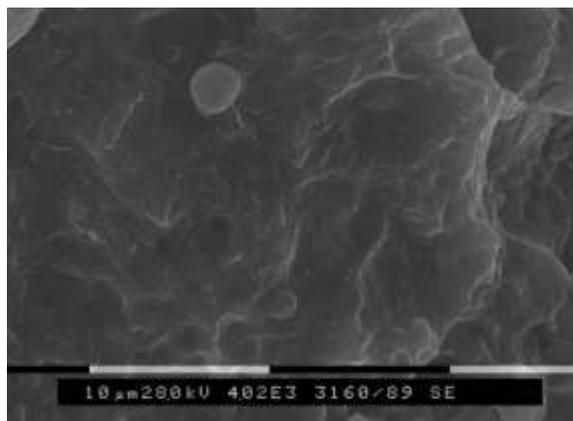


Рис. 15. SEM-изображение алюминия с включением 1,5% наномодификатора
Fig. 15. SEM image of aluminum with the inclusion of 1.5% of nanomodifier

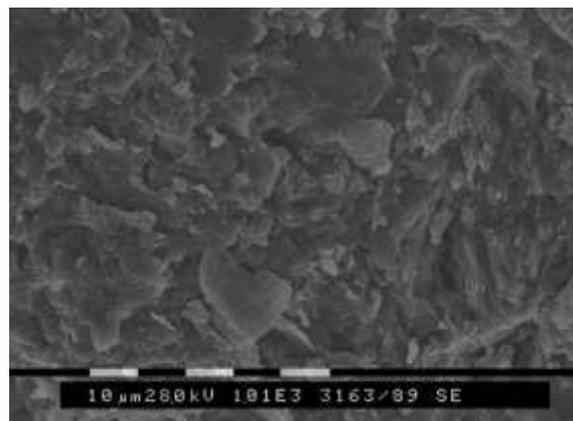


Рис. 16. SEM-изображение алюминия с включением 2% наномодификатора
Fig. 16. SEM image of aluminum with the inclusion of 2% of nanomodifier

импульсного давления обеспечивает компактирование порошковых электротехнических материалов, включающих в себя наномодификаторы, улучшающие электрофизические и механические характеристики материалов.

Проведенные эксперименты по компактированию порошкового алюминия и анализ SEM-изображений разлома компактов, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (JEOL JIB 4500), показали

высокую степень уплотнения частиц с образованием объемного композита. Однако используемый микроскоп не позволил идентифицировать включения нанометровых объектов. Для дальнейших исследований по компактированию порошкового алюминия с использованием импульсного источника давления предполагается разработать методику определения наличия в разломах компактов нанометровых объектов.

Список литературы

1. Kuz'min M.P., Ivanov N.A., Kondrat'ev V.V., Kuz'mina M.Yu., Begunov A.I., Kuz'mina A.S., Ivanchik N.N. Preparation of aluminum-carbon nanotubes composite material by hot pressing // *Metallurgist*. 2018. Vol. 61 P. 815–821. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0569-2>
2. Злобин С.Б., Пай В.В., Яковлев И.В., Кузьмин Г.Е. Взрывное компактирование алюминиевого порошка и исследование структуры компактов // *Физика горения и взрывов*. 2000. Т. 36. № 2. С. 105–109.
3. Прюммер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом / пер. с нем. М.: Мир, 1990. 126 с.
4. Петров Е.В., Сайков И.В., Щукин А.С. Ударно-волновое компактирование порошка алюминия // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016. Т. 21. Вып. 3. С. 1235–1237. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-3-1235-1237>
5. Степанов В.Г., Шавров И.А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1975. 280 с.
6. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом: монография. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск: Наука, 1980. 222 с.
7. Райнхарт Д.С., Пирсон Д. Взрывная обработка металлов: монография. М.: Изд-во иностранной литературы, 1966. 391 с.
8. Драбкина С.И. К теории развития канала искрового разряда // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 1951. Т. 21. Вып. 4. С. 473–483.
9. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде: монография. М.: Наука, 1971. 155 с.
10. Каляцкий И.И., Сёмкин Б.Ф., Халилов Д.Д. К анализу энергетических характеристик искры в контуре RLC // *Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция: сб. докл. Межвузовской науч.-техн. конф. по вопросам создания и методам испытания высоковольтной электрофизической аппаратуры / под ред. А.А. Воробьева (г. Томск, 1967 г.)*. М.: Энергия, 1970. С. 242–247.
11. Гегечкори Н.М. Экспериментальное исследование канала искрового разряда // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 1951. Т. 21. Вып. 4. С. 493–506.
12. Essmann S., Markus D., Maas U. Investigation of the spark channel of electrical discharges near the minimum ignition energy // *Plasma Physics and Technology*. 2016. Vol. 3. No. 3. P. 116–121. [Электронный ресурс]. URL: https://scholar.google.com/citations?user=k1CGoJcAAAAJ&hl=de#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dde%26user%3Dk1CGoJcAAAAJ%26citation_for_view



%3Dk1CGoJcAAAAJ%3AZph67rFs4hoC%26tzom%3D-480 (15.07.2020).

13. Kharlov A.V. Spark channel dynamics in railgun switches in unipolar and oscillatory discharges // *Laser and Particle Beams*. 2019. Vol. 37. Issue 2. P. 223–230. <https://doi.org/10.1017/S0263034619000429>

14. Kumar L. S., Chakravarthi S.R., Sarathi R., Jayaganthan R. Thermodynamic modeling and characterizations of Al nanoparticles produced by electrical wire explosion process // *Journal of Materials Research*. 2017. Vol. 32. Issue 4. P. 897–909. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.507>

15. Kolmakov V.P., Grechneva M.V., Potapov V.V., Chebotnyagin L.M. Improving the quality of the tube–tube plate welded joint in welding with the energy of electrical explosion of a conductor // *Welding International*. 2015. Vol. 29. Issue 8. P. 633–638. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.960699>

16. Potapov V.V., Kolmakov V.P., Chebotnyagin L.M. The algorithm of constructor and technological // *Energy Systems Research 2019: International E3S Web Conference of Young Scientists*. 2019. Vol. 114. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911403007>

17. Chebotnyagin L.M., Potapov V.V., Lopatin V.V. Kinetics of deformation of alloys by pulsed pressure of an electric discharge // *Russian Physics Journal*. 2015. Vol. 58. No. 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0462-4>

18. Chebotnyagin L.M., Potapov V.V., Lopatin V.V. Patterns of alloy deformation by pulsed pressure // *Russian Physics Journal*. 2015. Vol. 58. No. 2. P. 212–220. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0484-y>

19. Cole R.H. *Underwater explosions*. New Jersey: Princeton University Press, 1948. 495 p.

20. Круг К.А. *Основы электротехники*. Ч. 2. М.: Госэнергоиздат, 1946. 637 с.

References

1. Kuz'min MP, Ivanov NA, Kondratiev VV, Grigoriev VG, Kuz'mina MYu, Begunov AI, Kuz'mina AS, Ivanchik NN. Preparation of aluminum-carbon nanotubes composite material by hot pressing. *Metallurgist*. 2018;61:815–821 <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0569-2>

2. Zlobin SB, Pai VV, Yakovlev IV, Kuz'min GE. Explosive compaction of aluminum powder and the structure of compacts. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2000;36(2):105–109. (In Russ.)

3. Pryummer R. Processing of powder materials by explosion, 1990, 126 p. (Russ. ed.: *Obrabotka poroshkoobraznykh materialov vzryvom*. Moscow, Mir, 1990, 126 p.)

4. Petrov EV, Saykov IV, Shchukin AS. Shock-wave compaction of aluminum powder. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2016;21(3):1235–1237. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-3-1235-1237>

5. Stepanov VG, Shavrov IA. *High-energy pulse methods of metal processing*. Leningrad: Mashinostroenie; 1975, 280 p. (In Russ.)

6. Deribas AA. *Physics of hardening and welding by explosion: monograph*. Novosibirsk: Nauka; 1980, 222 p. (In Russ.)

7. Rinehart JS, Pearson J. *Explosive working of metals*, 1966, 391 p. (Russ. ed.: *Vzryvnaya obrabotka metallov*. Moscow, Izdatel'stvo Inostrannykh literatury, 1966, 391 p.)

8. Drabkina SI. To the theory of spark discharge channel development. *Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1951;21(4):473–483. (In Russ.)

9. Naugol'nyh KA, Roj NA. *Electric discharges in water: monograph*. Moscow: Nauka; 1971, 155 p. (In Russ.)

10. Kalyackij II, Syomkin BF, Halilov DD. To the analysis of energy characteristics of a spark in the RLC circuit. *Elektrofizicheskaya apparatura i elektricheskaya izolyatsiya: sbornik dokladov Mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii po voprosam sozdaniya i metodam ispytaniya vysokovol'tnoj elektrofizicheskoy ap-*

paratury / pod red. A.A. Vorob'eva = Electrophysical equipment and electrical insulation: collected reports of the Interuniversity scientific and technical conference on creation and testing methods of high-voltage electrophysical equipment. 1967, Tomsk. Moscow: Energiya; 1970, p. 242–247. (In Russ.)

11. Gegechkori NM. Experimental study of the spark discharge channel. *Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1951;21(4):493–506. (In Russ.)

12. Essmann S, Markus D, Maas U. Investigation of the spark channel of electrical discharges near the minimum ignition energy. *Plasma Physics and Technology*. 2016;3(3):116–121. Available from:

https://scholar.google.com/citations?user=k1CGoJcAAAAJ&hl=de#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dde%26user%3Dk1CGoJcAAAAJ%26citation_for_view%3Dk1CGoJcAAAAJ%3AZph67rFs4hoC%26tzom%3D-480 [Accessed 15th July 2020].

13. Kharlov AV. Spark channel dynamics in railgun switches in unipolar and oscillatory discharges. *Laser and Particle Beams*. 2019;37(2):223–230. <https://doi.org/10.1017/S0263034619000429>

14. Kumar LS, Chakravarthi SR, Sarathi R, Jayaganthan R. Thermodynamic modeling and characterizations of Al nanoparticles produced by electrical wire explosion process. *Journal of Materials Research*. 2017;32(4):897–909. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.507>

15. Kolmakov VP, Grechneva MV, Potapov VV, Chebotnyagin LM. Improving the quality of the tube–tube plate welded joint in welding with the energy of electrical explosion of a conductor. *Welding International*. 2015;29(8):633–638. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.960699>

16. Potapov VV, Kolmakov VP, Chebotnyagin LM. The algorithm of constructor and technological. In: *Energy Systems Research 2019: International E3S Web Conference of Young Scientists*. 2019;114.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911403007>
17. Chebotnyagin LM, Potapov VV, Lopatin VV. Kinetics of deformation of alloys by pulsed pressure of an electric discharge. *Russian Physics Journal*. 2015;58(1):56–62. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0462-4>
18. Chebotnyagin LM, Potapov VV, Lopatin VV. Patterns of alloy deformation by pulsed pressure. *Russian Physics*

Journal. 2015;58(2):212–220. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0484-y>
19. Cole RH. *Underwater explosions*. New Jersey: Princeton University Press; 1948. 495 p.
20. Krug KA. *Fundamentals of electrical engineering*. Part 2. Moscow: Gosenergoizdat; 1946, 637 p. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чеботнягин Леонид Михайлович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электроснабжения и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: leonid@istu.edu

Leonid M. Chebotnyagin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: leonid@istu.edu

Потапов Василий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: otep2@istu.edu

Vasily V. Potapov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: otep2@istu.edu

Иванов Николай Аркадьевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры радиоэлектроники
и телекоммуникационных систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: ivnik@istu.edu

Nikolay A. Ivanov,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate
Professor,
Associate Professor of the Department of Radio
Electronics and Telecommunication systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: ivnik@istu.edu

Иванчик Николай Николаевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: nkolayivanchik@gmail.com

Nikolay N. Ivanchik,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: nkolayivanchik@gmail.com

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 conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.07.20; одобрена после рецензирования 17.09.2020; принята к публикации 15.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 18.07.20; approved after reviewing 17.09.2020; accepted for publication 15.12.2020.



Гидрометаллургическая переработка мелкодисперсного фторуглеродсодержащего техногенного сырья производства первичного алюминия

© А.Э. Бараускас, Н.В. Немчинова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – определить условия максимального перехода фтора из техногенного сырья производства первичного алюминия (лежалого шлама) в раствор при щелочном выщелачивании. Объектом исследований явился лежалый шлак, образованный из мелкодисперсных техногенных материалов производства алюминия в электролизерах с анодом Содерберга (хвосты флотации угольной пены, шлак газоочистки, пыль электрофильтров) и складированный вблизи предприятия. Аналитические исследования исходной пробы и продуктов выщелачивания проводились по аттестованным методикам с применением химического, рентгенофазового, титриметрического методов анализа. Показано, что из трех составляющих шлама основная доля приходится на пыль электрофильтров (~79,7%) и хвосты флотации угольной пены (~15,8%). Установлено, что самым богатым по составу полезных компонентов (по сумме F, Na и Al ~ 63%) является шлак газоочистки. Согласно данным рентгенофазового анализа, проба шлама со шламохранилища содержит в основном криолит (до 78,7%), углерод (11,9%), кальциево-магниевый карбонат из ряда доломита (4,44%) и следовые количества корунда, флюорита. По результатам проведенных экспериментов по выщелачиванию раствором едкого натра фтора из пробы шлама были установлены основные параметры процесса: температура – 75–80°C, продолжительность – 60 мин, концентрация NaOH – 3,0% (при соотношении Ж:Т равном 10:1 и числе оборотов мешалки ~1005–1010 об/мин). Согласно аналитическим данным химического состава кека выщелачивания, содержание фтора в твердой фазе уменьшилось на 88,1%. В результате проведенных экспериментов по щелочному выщелачиванию фтора из пробы лежалого шлама, образованного при получении первичного алюминия электролизом криолит-глиноземных расплавов на ваннах с самообжигающимися анодами, было установлено, что максимальное снижение фтора в пробе достигается при условиях поддержания параметров процесса (температура, продолжительность, концентрация реагента) в оптимальных режимах.

Ключевые слова: производство первичного алюминия, электролиз, техногенное сырье, шлак газоочистки, пыль электрофильтров, хвосты флотации

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90212.

Для цитирования: Бараускас А.Э., Немчинова Н.В. Гидрометаллургическая переработка мелкодисперсного фторуглеродсодержащего техногенного сырья производства первичного алюминия. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1311–1323. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1311-1323>

Hydrometallurgical processing of technogenic finely dispersed fluorocarbon-containing raw materials of primary aluminum production

Alyona E. Barauskas, Nina V. Nemchinova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to determine the conditions for the maximum transition of fluorine from the technogenic raw materials of primary aluminum production (mature sludge) into solution under alkaline leaching. The object

of research is the mature sludge, which is formed from technogenic finely dispersed materials of aluminum production in the baths with Soderberg anodes (tailings of coal foam flotation, gas cleaning sludge, electrostatic precipitator dust) and stored close to the enterprise. Analytical studies of the initial sample and leaching products have been carried out according to the certified methods using chemical, X-ray phase and titrimetric analysis methods. It is shown that, the main percentage of the three sludge components belongs to the dust of electrostatic precipitators (~ 79.7%) and coal foam flotation tailings (~ 15.8%). It has been determined that the gas cleaning sludge features the richest composition of useful components (in the sum of F, Na and Al ~ 63%). According to the data of X-ray phase analysis, the sludge sample from the sludge storage mainly contains cryolite (up to 78.7%), carbon (11.9%), calcium-magnesium carbonate from the dolomite series (4.44%), and trace amounts of corundum and fluorite. The results of the conducted experiments on fluorine leaching from the sludge sample by the caustic soda solution allow to estimate the main process parameters: temperature - 75–80°C, duration - 60 min, NaOH concentration - 3.0% (with the W:T ratio of 10:1 and a stirrer speed of ~ 1005–1010 rpm). According to the analytical data on the chemical composition of leaching cake, the fluorine content in the solid phase reduces by 88.1%. The experiments carried out on alkaline leaching of fluorine from the sample of mature sludge formed under primary aluminum production by the electrolysis of cryolite-alumina melts in the baths with self-baking anodes allowed to find out that the maximum decrease of fluorine content in the sample is achieved under the conditions of maintaining the process parameters including temperature, duration, reagent concentration in optimal modes.

Keywords: primary aluminum production, electrolysis, technogenic raw materials, gas cleaning sludge, electrostatic precipitator dust, flotation tailings

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90212.

For citation: Barauskas AE, Nemchinova NV. Hydrometallurgical processing of technogenic finely dispersed fluorocarbon-containing raw materials of primary aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1311–1323. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1311-1323>

ВВЕДЕНИЕ

Металлургия является одной из передовых отраслей промышленности, обеспечивающих развитие каждой страны [1, 2].

В настоящее время мировое производство алюминия намного опережает выпуск всех других цветных металлов и составляет 50 млн т в год, из них Россия производит ~ 4 млн т. Алюминиевая отрасль нашей страны развивается за счет совершенствования технологического процесса электролиза [3–6], повышения энергоэффективности [7, 8], расширения сырьевой базы для производства глинозема [9–11], модернизации конструкций электролизных ванн [12], а также решения экологических проблем путем переработки техногенного сырья [13–18].

Производство первичного алюминия путем электролиза криолит-глиноземного расплава в электролизерах с самообжигающимися анодами (анодами Содерберга) сопровождается образованием побочных продуктов: шлама газоочистки, хвостов флотации угольной пены, пыли электрофильтров, а также отработанной футеровки электролизе-

ров. Данные материалы складываются на шламовых полях и полигонах и оказывают негативное воздействие на окружающую среду вблизи промышленных предприятий, производящих первичный алюминий.

Таким образом, в настоящее время при производстве алюминия образованы техногенные месторождения, в которых находятся фтористые соединения в объеме до 3 млн т (в пересчете на криолит).

В данной работе приведены результаты исследований, направленных на возможность переработки мелкодисперсного фторуглеродсодержащего техногенного сырья – лежалого шлама – ПАО «РУСАЛ Братск» филиала в г. Шелехов (Иркутский алюминиевый завод (ИркАЗ)).

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

К мелкодисперсному фторуглеродсодержащему техногенному сырью при производстве первичного алюминия на ваннах с анодом Содерберга относятся пыль электрофильтров, шламы газоочистки и хвосты флотации угольной пены [19, 20].

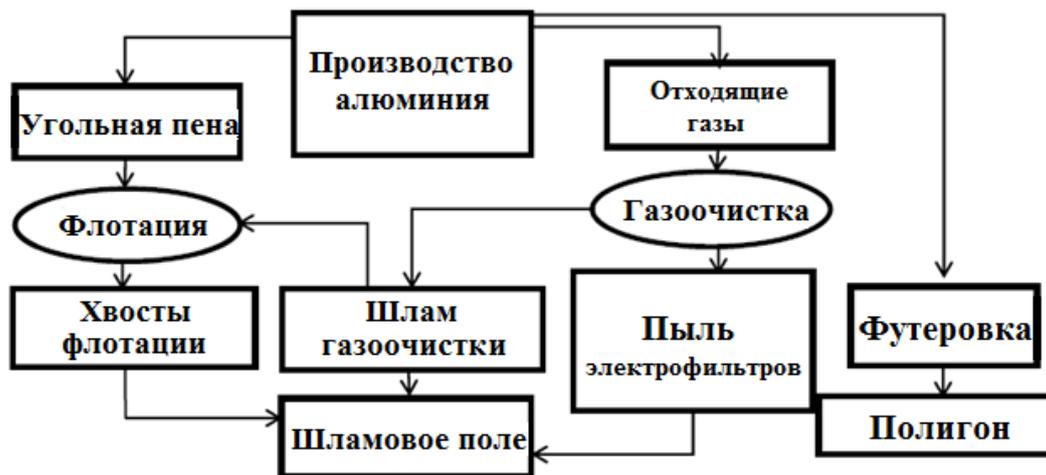


Рис. 1. Образование фторуглеродсодержащих отходов в производстве алюминия
Fig. 1. Formation of fluorocarbon-containing waste in aluminum production

В процессе электролиза отходящие газы от электролизеров поступают в систему газоочистки, включающую в себя электрофильтры для очистки газов от крупных частиц пыли для осуществления так называемой «сухой» очистки. Электрофильтрационные установки используются на большинстве отечественных алюминиевых предприятий¹. Данная пыль состоит из частиц сырьевых материалов, используемых в процессе электролиза (Na_3AlF_6 , Al_2O_3 , C) и после улавливания направляется на шламовое поле (шламонакопитель). Очищенные от грубой пыли газы направляются в систему «мокрой» газоочистки, основанной на поглощении фтористого водорода и сернистого ангидрида, всегда содержащиеся в отходящих газах, содобикарбонатным раствором (при добавлении алюмината натрия).

Шлам газоочистки образуется в результате разделения пульпы газоочистки на осветленный раствор и сгущенный продукт, и представляет собой мелкодисперсные частицы электролизной пыли со средним размером частиц шлама 7–20 мкм² [19]. Данный вид техногенного материала также может содержать частицы гидроалюмокарбоната

натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, входящего в поступающий на газоочистку содовый раствор. Еще одним возможным компонентом шлама может быть криолит, образующийся в аппаратах «мокрой» очистки газов при передозировке алюминатного раствора [19]. Осветленный раствор направляется на переработку с целью получения регенерационного криолита.

Угольная пена как техногенный продукт процесса электролиза образуется ввиду осыпания частиц углерода в электролит сформированного анода из-за различной реакционной способности кокса-наполнителя (нефтяного или пекового кокса) и кокса их связующего (каменноугольного пека) в результате электрохимических реакций углерода анода с оксифторидными комплексами [18]. Смачиваемость частиц углерода электролитом достаточно высокая и по своему составу угольная пена ~ на 65% состоит в основном из компонентов электролита (Na_3AlF_6 , Al_2O_3 , $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$) [19] и в минимальном количестве содержит примесные Mn, Pb, Co, Be, Cu, V, Zn, Ti, Mo, Ga, Ba, Ni, Cr, поступающие в процесс с сырьевыми материалами.

¹Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты газоочистки: учеб. пособ. Пенза: Изд-во ПГУ, 2006. 201 с.

²Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. Экология и утилизация отходов в производстве алюминия: учеб. пособ. Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1997. 158 с.

На отечественных алюминиевых заводах переработку угольной пены осуществляют флотационным способом – методом обратной флотации. Процесс флотационной переработки реализуется, как правило, в механических флотомашинах, куда подается пульпа с измельченной угольной пеной. Камерным продуктом является раствор с флотационным криолитом, возвращаемым в электролизное производство, а пенным – хвосты флотации с содержанием кроме основного компонента (углерода) до 8% масс. фтора, являющиеся отходом производства и также по шламопроводу транспортируемые в шламонакопитель. Химический состав хвостов флотации представлен углеродом, фтористыми солями и глиноземом. Как было указано выше, источником углерода в хвостах флотации является углерод, сформированный из анодной массы в процессе прохождения электрического тока по сталеалюминие-

вым штырям анода, а наличие фторсолей и глинозема связано с пропиткой электролитом угольной пены.

На ИркАЗе образуется фторуглеродсодержащих материалов до 9,4 тыс. т ежегодно, в которых содержится > 1100 т фтора. Извлечение фтора из данного вида техногенного сырья позволит сократить платежи за размещение данных материалов, а также получать больше товарной продукции, востребованной в производстве алюминия (табл. 1).

В табл. 2 [19] приведены типичные гранулометрический и фазовый составы мелкодисперсных фторуглеродсодержащих отходов алюминиевого производства.

В табл. 3 представлен удельный объем образования основных мелкодисперсных фторсодержащих отходов производства первичного алюминия на ИркАЗе. Результаты получены путем обобщения данных заводской практики предприятия за 2017 год.

Таблица 1. Образование мелкодисперсных фторуглеродсодержащих техногенных материалов на 1 т алюминия на Иркутском алюминиевом заводе (данные за 2017 г.)

Table 1. Formation of technogenic finely dispersed fluorocarbon materials per 1 ton of aluminum at the Irkutsk aluminum plant (data for 2017)

Наименование	Иркутский алюминиевый завод			
	Количество, кг/т Al	Количество, т/год	Содержание F, %	Количество F, т/год
Пыль электрофильтров	27,7	6485	14,37	932
Шлам минеральный системы газоочистки	2,0	358	27,84	52
Хвосты флотации угольной пены	10,9	2555	6,23	185
Итого:	40,6	9398		1169

Таблица 2. Характеристика фторуглеродсодержащих отходов алюминиевого производства

Table 2. Characteristic of fluorocarbon-containing waste of aluminum production

№	Характеристика	Виды отходов		
		Пыль электрофильтров	Шлам минеральный системы газоочистки	Хвосты флотации
1	Средний диаметр частиц, мкм	10–25	7–20	35–75
2	Содержание соединений, % масс., в среднем:			
	C (углерод)	26,7	21,5	80,5
	Na ₃ AlF ₆ (криолит)	12,1	35,0	9,2
	Na ₅ Al ₃ F ₁₄ (хиолит)	11,0	-	5,3
	Al ₂ O ₃ (оксид алюминия)	30,9	22,7	1,0
	Na ₂ SO ₄ (сульфат натрия)	4,1	6,6	-
	CaF ₂ (флюорит)	1,5	1,1	1,2
K ₂ NaAlF ₆ (эльпазолит)	2,8	1,8	0,46	

Таблица 3. Химический состав мелкодисперсных фторуглеродсодержащих отходов производства алюминия на Иркутском алюминиевом заводе

Table 3. Chemical composition of finely dispersed fluorocarbon waste of aluminum production at the Irkutsk aluminum plant

Наименование	Содержание, % масс.								
	F	Na	Al	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	MgF ₂	SO ₄ ²⁻	Проч.
Хвосты флотации	6,34	4,17	3,46	1,33	0,07	1,16	0,67	0,27	82,53
Шлам газоочистки	27,84	20,55	14,58	0,16	1,83	1,54	0,31	4,43	21,51
Пыль электрофильтров	14,37	9,59	16,81	0,22	2,77	1,50	1,10	2,75	42,43

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что хвосты флотации представлены в основном углеродом, в то время как самым богатым по составу полезных компонентов (по сумме F, Na и Al ~ 63%) является шлам газоочистки. Пыль электрофильтров содержит ~ 40,0% трех ценных составляющих. При этом пыль электрофильтров отличается достаточно бедным содержанием фтора, в отличие от шлама газоочистки, но большим содержанием алюминия в своем составе (в 4,8 раза больше, чем в хвостах флотации). Наибольшее содержание оксида железа, согласно полученным данным, находится в пробах пыли электрофильтров и шлама газоочистки, причиной чего могут служить особенности процесса очистки электролизных газов, в частности, коррозия элементов газоочистного оборудования, изготовленного в основном из чугуна и стали³.

Шлам газоочистки содержит большее количество натрия по сравнению с другими видами изучаемых образцов техногенного сырья (более чем в 2 раза), что объясняется технологией электролизного производства алюминия: использование в процессе обезвреживания электролизных газов раствора кальцинированной соды (Na₂CO₃).

На рис. 2 представлено соотношение мелкодисперсного фторуглеродсодержащего техногенного сырья, размещенного на шламохранилище ИркАЗа в настоящее время; как видно, основная доля приходится на пыль электрофильтров и хвосты флотации угольной пены.

Складирование техногенных материалов связано со значительными материальными затратами в виде ежегодной платы за размещение отходов в шламонакопителях: пыль

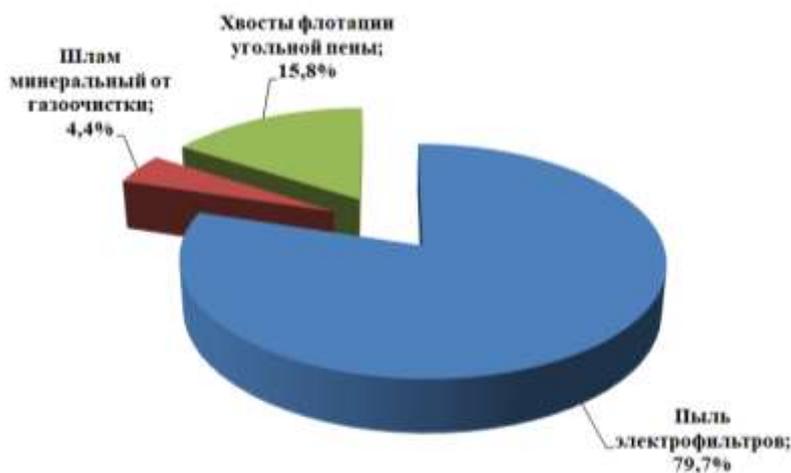


Рис. 2. Структура мелкодисперсных отходов алюминиевого производства
Fig. 2. Structure of finely dispersed aluminum production waste

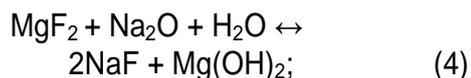
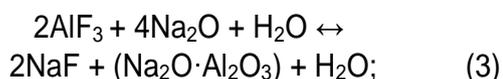
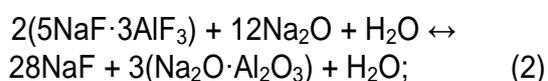
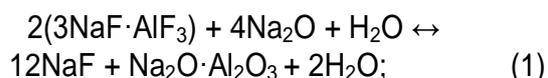
³Гринберг И.С., Терентьев В.Г., Чалых В.И., Черных А.Е. Электрометаллургия алюминия: учеб. пособ. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2009. 350 с.

электрофильтров и шлам газоочистки относятся к 3 классу опасности, хвосты флотации – к 4-му. В связи с этим проблема разработки способов утилизации данных мелкодисперсных техногенных материалов алюминиевого производства на сегодняшний день стоит особенно остро. И основным направлением наших исследований явилось изучение возможности максимального перевода ценного фтора в раствор при щелочной переработке лежалого шлама Иркутского алюминиевого завода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выщелачивание фтора из лежалого шлама шламохранилища № 2 ПАО «РУСАЛ Братск» филиала в г. Шелехов проводилось в лабораторных условиях.

Наилучшим растворителем фтора из техногенных отходов, образующихся при производстве первичного алюминия, является раствор едкого натра^{4,5}. Согласно проведенному изучению выщелачивания фтора гидроксидом натрия из отходов алюминиевого производства, процесс протекает в соответствии со следующими основными реакциями [16, 19, 20]:



Для проведения исследований была отобрана проба шлама со шламонакопителя № 2, извлеченного на временную площадку хранения. Шлам отобрали и подготовили согласно методам, описанным в [21]. В табл. 4 представлен химический состав фторуглеродсодержащего шлама.

Согласно данным рентгенофазового анализа, проба шлама со шламохранилища содержит в основном криолит (до 78,7%), углерод (11,9%), кальциевомагниевоый карбонат ряда доломитов (4,44%), а также следы α - Al_2O_3 -корунда, флюорита (рис. 3).

На основании изученных литературных источников³ [16] фиксированными параметрами выщелачивания были приняты следующие:

- соотношение Ж:Т равное 10:1, в связи с тем, что шлам шламохранилища является мелкодисперсным отходом и, следовательно, имеет весьма развитую поверхность взаимодействия (согласно результатам исследований, приведенных в работе³);

- число оборотов мешалки составило ~ 1005–1010 об/мин, которое было подобрано таким образом, чтобы не допустить осаждения твердых частиц.

В связи с тем, что для промышленного производства весьма важным фактором являются затраты на сырьевые ресурсы и электроэнергию, в качестве варьируемых параметров процесса были приняты следующие:

- температура выщелачивания – 40–80°C;

- продолжительность выщелачивания – 30–90 мин;

- концентрация едкого натра – 2,0–3,0%.

Таблица 4. Химический состав фторуглеродсодержащего шлама со шламонакопителя № 2

Table 4. Chemical composition of fluorocarbon sludge from the sludge storage no. 2

Наименование отхода	Содержание, %								
	F	Na	Al	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	MgF ₂	SO ₄ ²⁻	ппп*
Шлам шламохранилища	14,27	9,76	12,59	5,50	1,99	1,61	1,99	1,15	44,45

* ппп – потери при прокаливании.

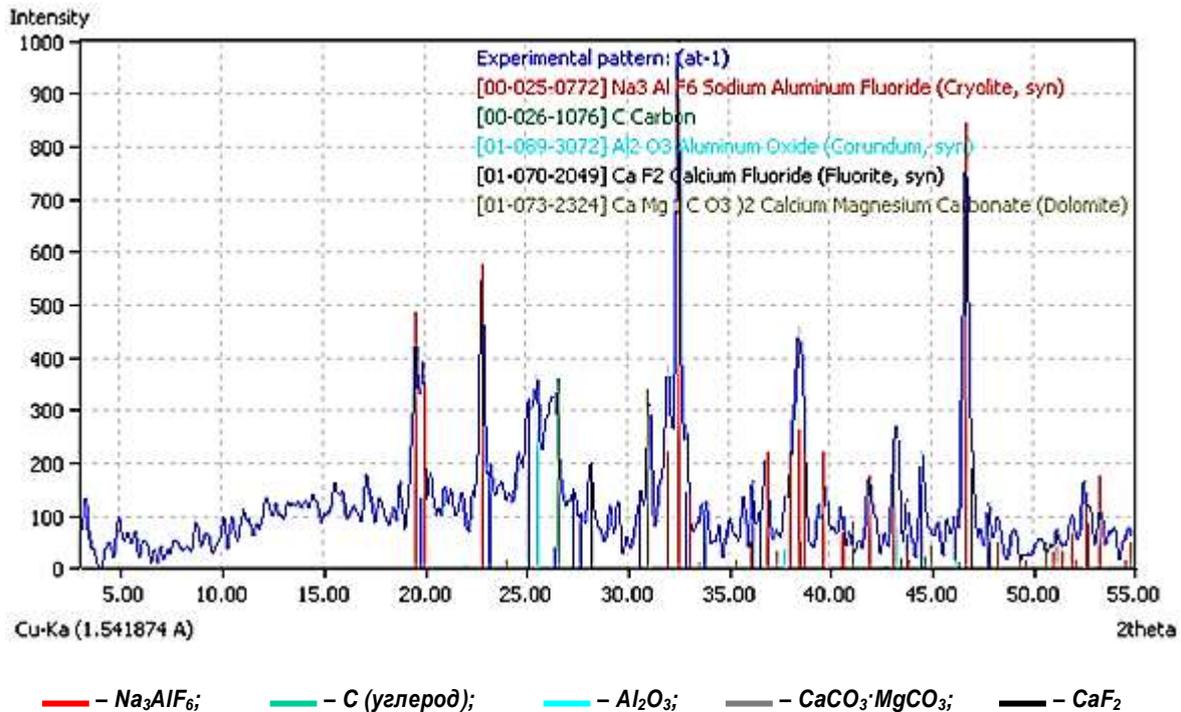


Рис. 3. Фазовый состав шлама со шлаохранилища № 2
Fig. 3. Phase composition of sludge from the sludge storage no. 2

В качестве перемешивающего устройства использовалась верхнеприводная мешалка IKA Eurostar digital, позволяющая осуществлять автоматический контроль скорости перемешивания. В качестве нагревательного прибора применялась песчаная баня с регулируемым нагревом температуры. Температура исследуемого раствора контролировалась с помощью стеклянного ртутного термометра.

Выщелачивание проводили в термостойком стеклянном стакане емкостью 400 мл при постоянном перемешивании. В качестве реагента использовали раствор едкого натра, который готовился путем смешивания твердого белого гранулированного вещества, выпускаемого по ГОСТ Р 55064-2012, и расчетного количества дистиллированной воды. Растворы необходимой концентрации готовились следующим образом: в дистиллированную воду необходимого объема засыпали

навеску сухой щелочи (масса воды и навески зависела от требуемой для экспериментов концентрации реагента) и тщательно перемешивали до полного растворения. В предварительно подогретый до необходимой температуры раствор щелочи объемом 200 мл помещали навеску шлама массой 20 г, что соответствует соотношению Ж:Т = 10:1. Температуру раствора контролировали и поддерживали постоянной в течение всего периода выщелачивания.

После окончания агитации пульпу фильтровали через фильтр «синяя лента» с помощью вакуумной установки: вакуумный насос → колба Бунзена → воронка Бюхнера.

В результате эксперимента получился фильтрат, в котором определялось содержание основных компонентов (NaF , Na_2CO_3 , Na_2SO_4), и кек на фильтре, который анализировался на содержание основных химических элементов. Раствор помещали в герметично

⁴Тимкина Е.В. Исследование и разработка технологии получения фтористых солей из фторуглеродсодержащих материалов при производстве алюминия: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Иркутск, 2016. 158 с.

⁵Сомов В.В. Технология получения криолита из катодных блоков отработанного алюминиевого электролизера: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Иркутск, 2019. 166 с.

закрытую колбу, кек высушивали и помещали в бумажный пакет, после чего объекты исследования отправляли для проведения анализов в центральную заводскую лабораторию (ЦЗЛ) ИркАЗа. Анализ исследуемых растворов и твердофазных проб осуществлялся в ЦЗЛ по соответствующим аттестованным методикам. Содержание фтора определяли по ГОСТ 10561-80⁶ титриметрическим методом анализа.

На рис. 4–6 представлены графические

зависимости изменения концентрации ионов фтора, в растворах после выщелачивания, от концентрации щелочи, температуры и времени агитации пульпы.

Статистическая обработка полученных результатов выполнена с помощью редактора Microsoft Excel. Оценка параметров осуществлена с помощью встроенной функции Microsoft Excel «Линия трендов». При этом был рассчитан коэффициент достоверности аппроксимации (R^2), который показывает

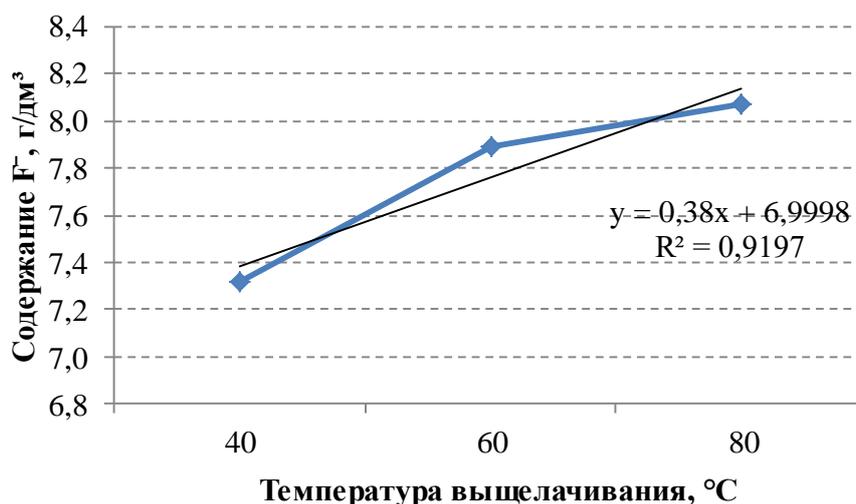


Рис. 4. Зависимость концентрации ионов фтора в исследуемых растворах от температуры выщелачивания
Fig. 4. Concentration of fluorine ions in the examined solutions vs leaching temperature

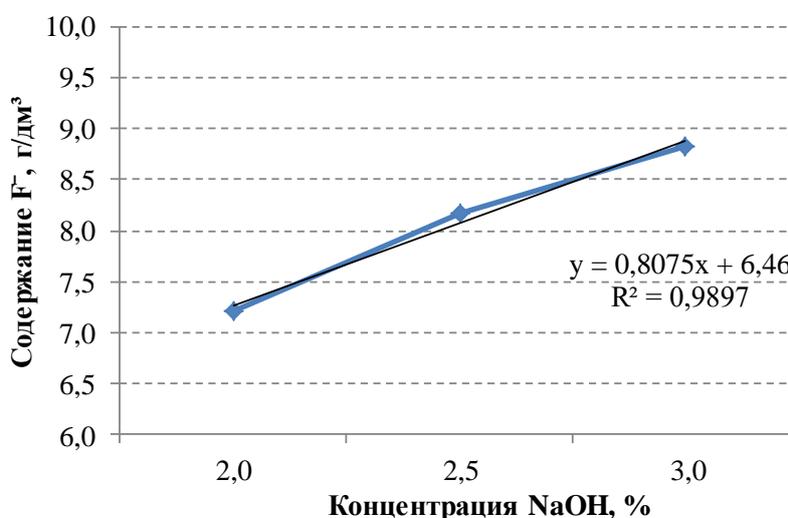


Рис. 5. Зависимость концентрации ионов фтора в исследуемых растворах от концентрации NaOH
Fig. 5. Concentration of fluorine ions in the examined solutions vs NaOH concentration

⁶ГОСТ 10561-80. Криолит искусственный технический. Технические условия. Введ. 01.01.1982 (дата посл. изм. 16.01.2015). М.: Изд-во стандартов, 1991.

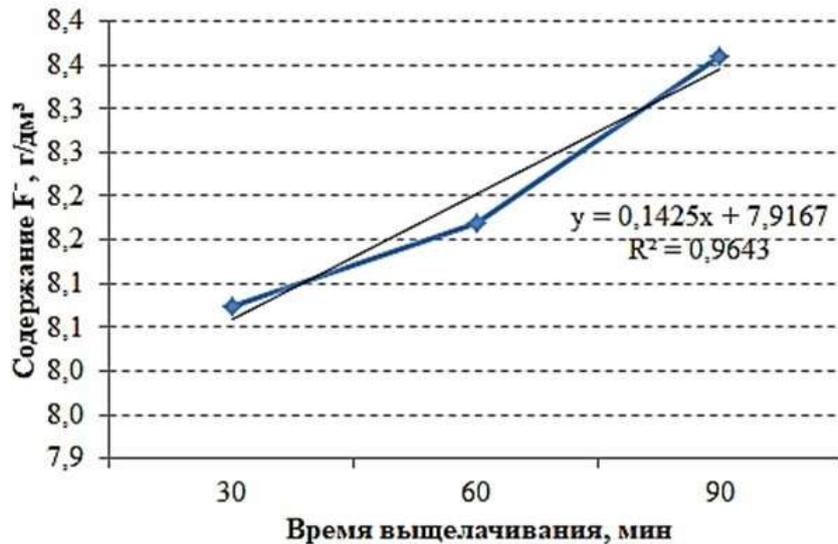


Рис. 6. Зависимость концентрации ионов фтора в исследуемых растворах от продолжительности выщелачивания
Fig. 6. Concentration of fluorine ions in the examined solutions vs leaching duration

степень соответствия трендовой модели исходным данным. Его значение может лежать в диапазоне от 0 до 1, и чем ближе R^2 к 1, тем достовернее полученные данные. В нашем случае показатель R^2 составил от 0,92 до 0,99 ед., что показывает на адекватность зависимостей, представленных на графиках. При этом на рис. 3–5 в качестве аппроксимирующей модели взят линейный тренд.

В результате полученных данных по выщелачиванию фтора из шлама шламохранилища № 2 можно сделать вывод о том, что при общих заданных условиях в раствор перешло от 7,0 до 9,0 г/дм³ ионов фтора. Максимально количество фтора перешло в раствор при максимальных температуре и про-

должительности выщелачивания. Наибольшее влияние, согласно полученным результатам, из исследуемых условий эксперимента оказала концентрация NaOH.

Также, проанализировав полученные зависимости (см. рис. 3–5), можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на количество фтора, перешедшего в раствор, оказывает время выщелачивания, однако следует отметить, что при прочих равных условиях в случае концентрации NaOH 3,0% продолжительность выщелачивания влияла на процесс не столь значительно.

Полученные результаты по содержанию основных компонентов в фильтратах, полученных после выщелачивания, представлены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры проведения экспериментов и химический состав растворов после выщелачивания
Table 5. Experiment parameters and chemical composition of solutions after leaching

Параметры проведения опыта			Содержание компонента, г/дм ³		
C _{NaOH} , %	Температура, °C	Продолжительность, мин	NaF	Na ₂ CO ₃	Na ₂ SO ₄
2,5	40	30	16,17	50,88	4,26
2,5	60	30	17,44	54,06	4,97
2,5	80	30	17,85	50,88	5,68
2,0	80	30	14,49	38,16	9,23
2,0	80	60	15,96	41,34	9,94
2,5	80	60	18,06	53,00	4,26
2,5	80	90	18,48	59,36	4,26
3,0	80	60	19,53	57,24	8,52
3,0	80	90	19,74	71,02	8,52

Таким образом, проанализировав все полученные данные, можно сделать вывод о том, что наиболее приемлемыми показателями процесса выщелачивания ценных компонентов из лежалого шлама со шламонакопителя № 2 ИркаЗа являются следующие:

- температура выщелачивания – 75–80°C;
- продолжительность – 60 мин;
- концентрация NaOH – 3,0%.

Также был определен химический состав кек выщелачивания (на анализ был направлен кек после эксперимента с определенными оптимальными параметрами) (рис. 7).

В результате анализа полученных данных было установлено, что содержание F в твердой фазе резко снизилось – на 88,1%, что является достаточно высоким показателем. Содержание Na уменьшилось в 4 раза, а вот содержание Al несколько увеличилось. По полученным данным видно, что в раствор также перешли сульфат-ионы, их содержание снизилось более чем в 2 раза. Также в 2 раза снизилось содержание MgF_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электролитическое получение алюминия сопровождается значительным объемом образования различных техногенных материалов. Ежегодно на ИркаЗе образуется до 9,4 тыс. т фторуглеродсодержащих материалов. К мелкофракционным фторуглеродсодержащим отходам, образующимся в процессе электролиза на ваннах с анодом Содерберга, относятся: пыль, улавливаемая в электрофильтрах, шлам газоочистки, хвосты флотации угольной пены. Показано, что из трех составляющих шлама основная доля приходится на пыль электрофильтров (~79,7%) и хвосты флотации (~15,8%). По результатам проведенного анализа химического состава лежалого шлама мелкодисперсных фторуглеродсодержащих отходов производства алюминия на ИркаЗе установлено, что самым богатым по составу полезных компонентов (по сумме F, Na и Al ~ 63%) является шлам газоочистки. С целью извлечения и максимального перевода ценного фтора в раствор были проведены исследования по щелочной переработке лежалого шлама.

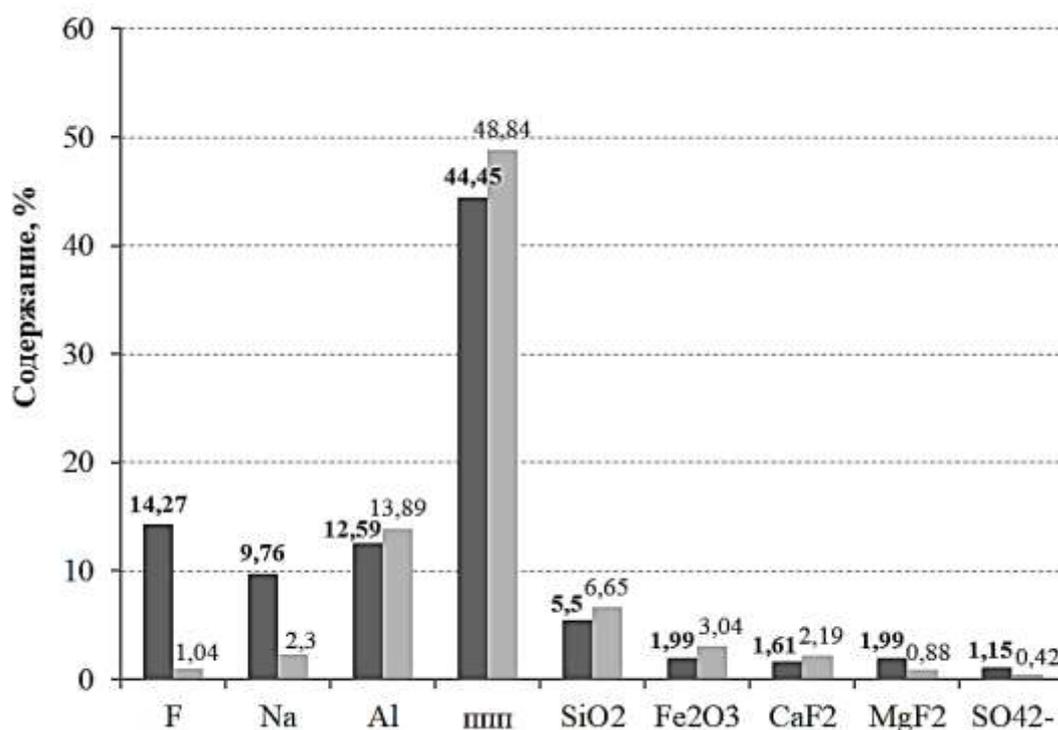


Рис. 7. Сравнение химического состава шлама до и после выщелачивания
Fig. 7. Comparison of sludge chemical composition before and after leaching

На основе проведенного анализа по выщелачиванию фтора из лежалого шлама шламохранилища № 2 ИркАЗа было установлено, что оптимальными параметрами щелочного выщелачивания фтора являются: температура – 75–80°C, продолжительность – 60 мин, концентрация NaOH – 3,0% (при

соотношении Ж:Т равном 10:1 и числе оборотов мешалки ~1005–1010 об/мин). Согласно аналитическим данным химического состава кека выщелачивания, содержание фтора в твердой фазе уменьшилось на 88,1%.

Список литературы

1. Nosov S.K., Roshchin A.V., Roshchin V.E., Chernyakhovskii B.P. Theoretical basis, modern technologies, and innovations of ferrous metallurgy // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. Vol. 2012. Issue 12. P. 1007–1013. <https://doi.org/10.1134/S0036029512120099>
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. Горланов Е.С. Особенности применения твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 2. С. 356–366. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-356-366>
4. Манн В.Х., Пингин В.В., Архипов Г.В., Жердев А.С., Прошкин А.В., Авдеев Ю.О. [и др.] Ресурсосберегающие технологии ОК РУСАЛ // *Цветные металлы и минералы-2019: сборник докл. Одиннадцатого международного конгресса (г. Красноярск, 16–20 сентября 2019 г.)*. Красноярск: ООО «Научно-инновационный центр», 2019. С. 225–230.
5. Бажин В.Ю., Смольников А.Д., Петров П.А. Концепция энергоэффективного производства алюминия «Электролиз 600+» // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 5. Ч. 3. С. 37–40. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.113>
6. Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Володькина А.А. Изучение влияния параметров процесса электролиза на основные технико-экономические показатели работы ванн ОА-300М // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 4. С. 906–918. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>
7. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in power consumption at UC Rusal's smelters 2012-2014 // *Light Metals*. 2015. P. 757–762. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch128>
8. Пат. № 2682507, Российская Федерация, С25С 3/12. Способ снижения контактного напряжения в алюминиевом электролизере / П.В. Поляков, С.Г. Шахрай, И.И. Пузанов, Ю.Г. Михалев, А.В. Завадяк, В.А. Крюковский [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федераль- ный университет». Заявл. 10.01 2018; опубл. 19.03.2019. Бюл. № 8.
9. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // *Non-ferrous Metals*. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>
10. Shoppert A.A., Loginova I.V. Surface activation of industrial aluminum hydroxide for preparing sandy alumina // *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. P. 871–876. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0379-3>
11. Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Sizyakova E.V. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite // *Metallurgist*. 2016. Vol. 59. P. 1135–1141. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0228-4>
12. Шахрай С.Г., Дектерев А.А., Минаков А.В., Необъявляющий П.А., Шарыпов Н.А. Модернизация анодного кожуха алюминиевого электролизера Содерберга // *Механическое оборудование металлургических заводов*. 2018. № 1. С. 34–39.
13. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The First Results of the Industrial Application of the EcoSoderberg Technology at the Krasnoyarsk Aluminium Smelter // *Light Metals*. 2013. P. 573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>
14. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия // *Цветные металлы*. 2018. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>
15. Mann V., Pingin V., Zherdev A., Bogdanov Y., Pavlov S., Somov V. SPL Recycling and Re-processing // *Light metals*. 2017. P. 571–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_71
16. Баранов А.Н., Тимкина Е.В., Тютрин А.А. Исследования по выщелачиванию фтора из углеродсодержащих материалов производства алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 7. С. 143–151. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-143-151>
17. Nemchinova N.V., Yakushevich P.A., Yakovleva A.A., Gavrilenko L.V. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast

iron smelting // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. Issue 1–2. P. 150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
18. Белоусова О.В., Шарыпов Н.А., Шахрай С.Г., Безруких А.И. Угольная пена в алюминиевом электролизере: проблемы и некоторые пути их решения // *Цветные металлы*. 2017. № 8. С. 43–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.06>
19. Куликов Б.П., Истомин С.П. Переработка отходов алюминиевого производства. Красноярск: Классик Центр, 2004. 480 с.
20. Тимкина Е.В., Баранов А.Н., Петровская В.Н., Ер-

шов В.А. Термодинамика процесса выщелачивания фтора из отходов алюминиевого производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. № 12. С. 182–192. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-12-182-192>
21. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бараускас А.Э. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки // *Цветные металлы*. 2019. № 12. С. 22–29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>

References

1. Nosov SK, Roshchin AV, Roshchin VE, Chernyakhovskii BP. Theoretical basis, modern technologies, and innovations of ferrous metallurgy. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012;12:1007–1013. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0036029512120099>
2. Sizyakov VM, Vlasov AA, Bazhin VYu. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex. *Tsvetnye Metally*. 2016;1:32–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
3. Gorlanov ES. Features of solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(2):356–366. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-356-366>
4. Mann VKh, Pingin VV, Arkhipov GV, Zherdev AS, Proshkin AV, Avdeev YuO, et al. RUSAL resource-saving technologies. In: *Tsvetnye metally i mineraly-2019: sbornik dokl. Odinnadtsatogo mezhdunarodnogo kongressa = Non-Ferrous Metals & Minerals: book of papers of the eleventh international Congress*. 16–20 September 2019, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Nauchno-innovatsionnyy Centr; 2019, p. 225–230.
5. Bazhin VU, Smol'nikov AD, Petrov PA. Concept of energy efficiency aluminum production "Electrolysis 600+". *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2016;5(3):37–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.113>
6. Tyutrin AA, Nemchinova NV, Volodkina AA. Effects of electrolysis parameters on the technical and economic performance indicators of OA-300M baths. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):906–918. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>
7. Mann V, Buzunov V, Pitertsev N, Chesnyak V, Polyakov P. Reduction in power consumption at UC RUSAL's smelters 2012–2014. *Light Metals*. 2015:757–762. <https://doi.org/10.1002/9781119093435.ch128>
8. Polyakov PV, Shakhrai SG, Puzanov II, Mikhalev YuG, Zavyadyak AV, Kryukovsky VA, et al. *Method of contact voltage reduction in aluminium electrolyzer*. Patent RF, no. 2682507;2014. (In Russ.)
9. Dubovikov OA, Brichkin VN, Ris AD, Sundurov AV. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-Ferrous Metals*. 2018;2:11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>
10. Shoppert AA, Loginova IV. Surface activation of industrial aluminum hydroxide for preparing sandy alumina. *Metallurgist*. 2016;60:871–876. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0379-3>
11. Sizyakov VM, Bazhin VYu, Sizyakova EV. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite. *Metallurgist*. 2016;59:1135–1141. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0228-4>
12. Shakhrai SG, Dekterev AA, Minakov AV, Neobyavlyayushchy PA, Sharypov NA. Modernization of an anode shell of a Soderberg aluminum electrolyzer. *Mekhanicheskoye oborudovaniye metallurgicheskikh zavodov*. 2018;1:34–39. (In Russ.)
13. Buzunov V, Mann V, Chichuk E, Frizorger V, Pinaev A, Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk aluminium smelter. *Light Metals*. 2013:573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>
14. Burdonov AE, Zelinskaya EV, Gavrilenko LV, Gavrilenko AA. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye Metally*. 2018;3:32–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>
15. Mann V, Pingin V, Zherdev A, Bogdanov Yu, Pavlov S, Somov V. SPL Recycling and re-processing. *Light Metals*. 2017:571–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_71
16. Baranov AN, Timkina EV, Tyutrin AA. Research on leaching fluorine from carbon-containing materials of aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceeding of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(7):143–151. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-143-151>



17. Nemchinova NV, Yakushevich PA, Yakovleva AA, Gavrilenko LV. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting. *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. P. 150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
18. Belousova OV, Sharypov NA, Shakhray SG, Bezrukikh AI. Coal froth in an aluminium electrolyzer: the problems and proposed solutions. *Tsvetnye Metally*. 2017;8:43–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.06>
19. Kulikov BP, Istomin SP. Recycling of aluminum production waste. Krasnoyarsk: Klassik Centr, 2004, 480 p. (In Russ.).

20. Timkina EV, Baranov AN, Petrovskaya VN, Ershov VA. Thermodynamics of fluorine leaching from aluminum production waste. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(12):182–192. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-12-182-192>
21. Nemchinova NV, Tyutrin AA, Barauskas AE. Analysing the chemical composition of man-made materials resultant from the production of primary aluminium in order to find cost-effective recycling techniques. *Tsvetnye Metally*. 2019;12:22–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бараускас Алёна Эдуардовна,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет, 664074, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: barauskas.alena@mail.ru

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

Заявленный вклад авторов

Бараускас А.Э. – проведение экспериментов и обработка данных. Немчинова Н.В. – научное руководство, концепция исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.09.20; одобрена после рецензирования 23.10.2020; принята к публикации 16.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alyona E. Barauskas,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: barauskas.alena@mail.ru

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

Contribution of the authors

Barauskas A.E. conducted experiments and performed data processing. Nemchinova N.V. was responsible for the scientific supervision and the research concept.

Conflict of interests

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

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

Information about the article

The article was submitted 12.09.20; approved after reviewing 23.10.2020; accepted for publication 16.12.2020.



On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 1.

Evgeniy S. Gorlanov

«EXPERT-AL» LLC, St. Petersburg, Russia

Abstract: This article is aimed at identifying issues associated with the use of solid cathodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts in order to determine conditions for their practical application. The contemporary technology of using solid anodes and cathodes is reviewed from its inception to the present time. The problems of stable electrolysis are discussed, such as effects of the electrode surface on the technological process. It is shown that all attempts undertaken over the recent 100 years to use solid electrodes, both reactive and inert, have been challenged with the emergence of electrolysis instability, formation of precipitates of varying intensity on the electrodes and impossibility of maintaining a prolonged process at current densities of above 0.4–0.5 A/cm². Information is provided on the attempts to use purified electrolyte components with different ratios, metal-like and ceramic electrodes with a high purity and a smooth surface in order to approach real industrial conditions. However, to the best of our current knowledge, these experiments have not found commercial application. The authors believe that the most probable reason for the decreased current efficiency and passivation of solid electrodes consists in the chemical inhomogeneity and micro-defects of the bulk and surface structure of polycrystalline cathodes and anodes. It was the physical inhomogeneity of carbon electrodes that directed the development of the nascent electrolytic production of aluminium towards the use of electrolytic cells with a horizontal arrangement of electrodes and liquid aluminium as a cathode. This reason is assumed to limit the progress of electrolytic aluminium production based on the use of inert anodes and wettable cathodes in the designs of new generation electrolytic cells implying vertically arranged drained cathodes. The theoretical and experimental examination of this assumption will be presented in the following parts of the article.

Keywords: electrolysis, solid electrodes, physical heterogeneity, cathode passivation, inert anodes, wettable cathodes

For citation: Gorlanov ES. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 1. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1324–1336. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1324-1336>

УДК 620.181.4: 666.3-135

К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 1.

© Е.С. Горланов

ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ», г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Цель – обозначение проблем и определение условий применения твердых катодов. Представлен обзор технологии электролиза криолитоглиноземных расплавов с использованием твердых анодов и катодов в историческом развитии – от ее изобретения и до настоящего времени. Обсуждаются проблемы стабильного ведения электролиза, но главным образом – влияние состояния поверхности электродов на технологический процесс. Показано, что все попытки использования твердых электродов, реактивных и инертных, на протяжении более 100 лет встречались с возникновением нестабильности электролиза, образования на электродах осадков различной интенсивности и невозможности ведения процесса в течение длительного периода при плотностях тока выше 0,4÷0,5 A/cm². Приведены данные, что для приближения к промышленным условиям исследователи пытались применять очищенные компоненты электролита с различным их соотношением, металлоподобные и керамические электроды с исходной высокой чистотой и гладкой поверхностью. Тем не менее, коммерческого выхода этим многочисленным попыткам в доступных источниках не обнаружено. В предлагаемой к обсуждению статье предполагается, что наиболее вероятной причиной уменьшения выхода по току и пассивации твердых электродов является химическая неоднородность и микродефектность объемной и поверхностной структуры поликристаллических катодов и анодов. Именно физическая неоднородность угольных электродов направила развитие зарождающейся технологии электролитического производства алюминия на применение электролизеров с горизонтальным расположением электродов и использование в качестве катода однородной поверхности жидкого

алюминия. Эта же причина ограничивает развитие электролитического получения алюминия с использованием инертных анодов и смачиваемых катодов в конструкциях электролизеров нового поколения – с дренированными катодами и вертикальным расположением электродов. Развитие этого предположения, теоретическое и экспериментальное, будет обсуждаться в следующих частях статьи.

Ключевые слова: электролиз, твердые электроды, физическая неоднородность, пассивация катода, инертные аноды, смачиваемые катоды

Для цитирования: Горланов Е.С. К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 1. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1324–1336. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1324-1336>

INTRODUCTION

Attempts to develop an approach to the electrolysis of cryolite-alumina melts using solid electrodes have been ongoing since the inception of aluminium production. Such persistence can be explained, on the one hand, by the prospect of increasing the specific productivity of the process using vertically arranged electrodes in the limited volume of an electrolytic bath. On the other, there has always been a desire to minimize power consumption to the theoretically possible values of 6.242 and 9.162 kWh/kg Al when using carbon and inert electrodes, respectively [1]. These values are assumed attainable under the polar-to-polar distance (PPD) of about 1.5÷2.0 cm, which can be achieved only between solid electrodes. Nevertheless, for more than 130 years, the industrial production of aluminium has relied on electrolytic cells with a horizontal arrangement of electrodes and the use of the uniform surface of liquid aluminium as the cathode. Researchers in [2, 3] explained the long-term lack of progress in the commercial development of electrolysis based on inert electrodes by micro-defects of polycrystalline cathode surfaces. The results of these studies are generalized in¹, but require further research under laboratory and industrial conditions. It is of primary importance to elucidate the causal relationship between the surface heterogeneity of electrodes, their passivation and the instability of the electrolysis process. This understanding can contribute to elaborating on the conditions of using solid cathodes. In this part of the article, we will discuss the pioneering works on the electrolytic production of aluminium and modern

studies developing methods for the electrolysis of cryolite-alumina melts using solid electrodes through the prism of contemporary knowledge and achievements in the field.

19th CENTURY

It is common knowledge that the electrolytic production of aluminium from halide melts began with the use of solid electrodes. Among numerous methods for the electrolysis of molten salts at the end of the 19th century, only the methods proposed by Paul L.T. Héroult, Charles M. Hall and Adolphe Minet were of industrial importance. In fact, these researchers patented compositions of electrolytes based on cryolites and the dissolved aluminium oxide. In their first prospecting works, patents and industrial units, the authors used metal and carbon electrodes arranged vertically and parallel to each other in electrolytic cells.

P. Héroult submitted his first patent application on April 23, 1886 in France and registered it in September of the same year [4]. Later in 1887–88, the same process with minor modifications was patented in England and Belgium. According to this method, cryolite-alumina melts underwent electrolysis to yield aluminium. The walls of a graphite crucible served as the cathode; a cylindrical carbon anode was immersed in the melt in the centre of the cell, the temperature in which was maintained by an external source. Thus, in a crucible with a depth of 20 cm and an inner diameter of 14 cm, at a current of 400 A and a voltage of 20–25 V, relatively pure aluminium was obtained at current densities at the cathode and anode of 0.45 A/cm² and 1.70

¹Gorlanov ES. Doping of cathodes used in aluminium electrolytic cells by a low-temperature synthesis of titanium diboride: Dissertaiion for the Degree of Dr. Sci. in Engineering: 05.16.02. Saint-Petersburg, 2020. 391 p. / Горланов Е.С. Легирование катодов алюминиевых электролизеров методом низкотемпературного синтеза диборида титана: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. СПб., 2020. 391 с.

A/cm^2 , respectively. Héroult mentioned no limitations of the presented electrolytic process, except for the resistance of the carbon crucible and the increased consumption of the anode.

Charles Hall filed his first patent application on July 9, 1886 under No. 207601 [5]. Hall patented an electrolytic cell with external heating and a carbon lining, in which the negative and positive electrodes were immersed vertically in the molten salt $NaF \cdot AlF_3$ ($NaAlF_4$) with the addition of alumina under the cryolite ratio (CR) = 1. After melting the dry salts, the electrolysis current was switched on. The anode was made either of carbon (to obtain pure Al) or Cu, Pt and other metals. It should be noted that, when a carbon anode was used, CO was released at the electrode. Conversely, the use of a copper anode resulted in the release of oxygen. In order to reduce the melting point, it was proposed to substitute some part of NaF with LiF. Aluminium at the cathode was reduced in the form of globules, which sank to the bottom of the crucible.

Since the productivity of an electrolysis unit working on this principle was rather low, Hall continued to improve his method. In an additional application No. 226206 submitted on February 2, 1887, Hall presented a different electrolyte composition – $KF \cdot AlF_3$ ($KAlF_4$) with alumina (CR = 1) [6]. The optimal voltage across the cell was indicated to equal 3–4 V. Similar to the previous application, the possibility of using the walls of a carbon crucible as the cathode was confirmed, thus resembling Héroult's patent in its key aspects.

Continuous testing of the proposed method failed to solve issues associated with unstable electrolysis. In his next application No. 282954 dated August 17, 1888 Hall noted that, when using the electrolyte composition according to the previous patents, a black or dark substance would form in the near-cathode electrolyte. This substance impeded electrolysis, increasing the electrical resistance in the system and requiring frequent renewal of the melt [7]. Therefore, the purpose of the patented invention was to provide an electrolyte composition, under which electrolysis could be carried out continuously without adjusting the current and terminating the electrolysis. It was proposed to use the compositions $CaF_2 \cdot 2AlF_3$ ($CaAl_2F_8$) and $3CaF_2 \cdot 2AlF_3$

($Ca_3Al_2F_{12}$) with the addition of $BaAl_2F_8$ and $SrAl_2F_8$. These compositions were heavier than metal, thus allowing aluminium to be floating on the surface. Therefore, a carbon baffle was needed between the anode and cathode regions to protect the cathode from oxidation. At the same time, to reduce the density of the electrolyte, it was proposed to add $2KF \cdot 2AlF_3$ ($K_2Al_2F_8$) to the ready-made compositions in the amount of 2/3 of its weight. Then the obtained aluminium would remain under the melt, requiring no baffle. It should be mentioned that, according to the scheme proposed by Hall, the size and, therefore, the entire cathode area was much smaller than that of the anode. This meant that the current density at the cathode was higher than that at the anode. Perhaps Hall provided for a possibility of working at lower anode densities to reduce anode consumption.

According to the supplementary patent application No. 282955 also filed on August 17 in 1888, a black precipitate was largely formed in an electrolyte consisting of sodium and aluminium fluorides rather than in that consisting of potassium, calcium and aluminium fluorides [9]. In this regard, Hall proposed to use the melt composition $Na_2Al_2F_8 + CaAl_2F_8$ ($NaF \cdot AlF_3 + CaF_2 \cdot 2AlF_3 = NaF \cdot CaF_2 \cdot 2AlF_3$), i.e. with a molar ratio of CR = 0.5. This composition is characterized by a lower density than aluminium, which allowed the metal to sink to the bottom of the crucible. It was noted that addition of aluminium oxide in amounts larger than could be dissolved was not problematic, since its excess would deposit at the bottom in the form of a precipitate and would be consumed upon its lack in the electrolyte. The electrolytic cell was operated at a voltage of about 6 V, although larger voltage ranges were also possible.

Charles Hall registered his last application in this series (No. 286034) on September 21, 1888 [9]. It was noted that the disruption of the process began with passivation of the carbon cathode. Thus, under the same conditions and the use of the same electrolytes, metal cathodes did not passivate. Following numerous experiments, Hall concluded that the stability and the very possibility of electrolysis depended on the electrolyte composition. In this regard, it was proposed to use electrolytes of compositions speci-

fied in his previous applications, but with the addition of 3–4 % wt. calcium chloride, in the presence of which the process would proceed without noticeable decomposition of the electrolyte at a voltage of 4–8 V.

In this brief review of Héroult's and Hall's methods, we deliberately drew attention to the stability of cathodic processes and the entire electrolysis of molten salts. The design of Héroult's electrolytic cell, in which a carbon cathode was operated at current densities lower than 0.5 A/cm^2 , allowed a stable process under laboratory conditions with a rise of up to 400 A. Conversely, in Hall's designs with equal geometric current densities at the anode and cathode (the current intensity was not indicated), the process was unstable and was followed by passivation of the carbon cathode with dark precipitates. It can be assumed that the use of an electrolyte composition with a cryolite ratio of 0.5–1.0 and a corresponding low solubility of aluminium oxide, an insufficient content of dissolved alumina in the melt made the electrolytic cell operate at limiting values of diffusion current densities. In that case, the cathode potential shifted towards more electronegative voltages (without changing the total current) up to the decomposition potentials of the electrolyte components. It goes without saying that the composition of the electrolyte with a low CR had a significant effect on the stability of the entire process. However, Hall noted that, in the same electrolytes, the process was stable when using metal cathodes. In this regard, we cannot assume any other reason for the instability of electrolysis and passivation of the carbon cathode, except for the condition of the cathode surface, i.e. the physical inhomogeneity of the electrode surface (pores, irregularities, cold shuts, scratches and other defects). It is known that the electrical engineering industry was only at the beginning of its development at that time. It was impossible to purchase carbon electrodes with a diameter of more than 50 mm, and the available carbon products were of low quality.

On the basis of these preliminary findings, it becomes possible to explain the results obtained by Adolphe Minet, a famous French researcher and electrical engineer. In 1887 and 1888, at the Bernard Bros. at Creil, Minet exper-

imented with the electrolysis of cryolite-alumina melts containing sodium chloride, producing about 15–20 kg of aluminium per day [10]. In fact, his process and industrial units differed from those proposed by Hall and Héroult only by the addition of NaCl to the electrolyte. However, unlike his colleagues, Minet investigated not only electrolysis, but also conducted systematic theoretical studies under laboratory and industrial conditions. In particular, he investigated the dependence of current efficiency (CE) on current density and cathode material. Small laboratory cells with iron cathodes, which were operated for 12–24 hours at current densities of up to 0.5 A/cm^2 and voltages of 5.5–5.75 V, produced the CE of no more than 52%. However, when carbon cathodes were used, the CE of about 75% was achieved. The opposite situation was observed when the current density was raised above 0.5 A/cm^2 . Then the CE on carbon cathodes did not exceed 52–54%, although this indicator ranged from 68 to 82% in cells with iron cathodes. These findings were confirmed on semi-industrial electrolytic cells with a current of 3000 A. The only difference was that, at higher current densities, the values of current efficiency depended more strongly on the cathode material used: the application of carbon cathodes resulted in the CE of 66–70%, while iron electrodes made it possible to reach CE = 90%. Generalizing the results of his experiments, Minet assessed the electricity consumption for the production of 1 kg of aluminium at the level of 32 and 23 kWh for carbon and iron cathodes, respectively. Unfortunately, the author did not provide any explanation for these results. However, the current level of knowledge about the influence of the cathode surface on electrochemical processes [11–14] allows us to propose the following assumption. At a low geometric current density (in our case, up to 0.5 A/cm^2), its uneven distribution over the surface of polycrystalline electrodes does not approach critical levels, i.e. the limiting current density. The cathodic process proceeds in a stable diffusion mode with a potential that ensures the discharge of the target melt components – aluminium ions. On a carbon cathode with surface micro-defects, the actual current density will be higher than that on a relatively uniform surface of an iron cathode. There-

fore, the rate of the process, and hence the aluminium output over a particular time period will be higher. This situation changes when a certain current density is exceeded (in our case, 0.5 A/cm^2). An increase in current density intensifies its non-uniform distribution, similar to the corresponding current concentration on the defects of the surface structure – on the peaks or sharp edges of pores and irregularities. In this case, the current density at the carbon cathode can reach the limiting value not only for the discharge of aluminium ions, but also for more electronegative ions, e.g., calcium. Under an avalanche-like development of the process, a simultaneous discharge of electronegative impurities (sodium, calcium) and the decomposition of aluminium fluoride and cryolite are possible, followed by partial or complete passivation of the electrode. When describing the course of electrolysis, Minet did not indicate problems associated with the stability of the process; however, a moderate manifestation of these effects, i.e., current consumption for inappropriate reactions, could lead to an overestimated power consumption and an underestimated current efficiency when using carbon cathodes. In conclusion, let us emphasize that, in 1890, a more powerful electrolysis plant was built in Saint-Michel, Savoy, based on Minet's method. By 1894, this plant had been producing 450 kg of aluminium per day. However, the facility was transferred to Hall's process in 1895, reportedly due to the relatively high cost of production.

It is essential to understand the reasons explaining the popularity and spread of Hall's technology and industrial units in the USA, Canada and Europe. Note that two patent applications dated 1886 and 1887 refer to the period of Hall's work in his own laboratory (table).

The other three applications, August–September 1888, were submitted immediately after the severance of Hall's relations with the Electric Smelting and Aluminium Co^o (Cowles brothers), operating in Lockport, NY (Lockport, NY). This breakup was triggered by the unsatisfactory results of Hall's experiments on a small scale, and the additional patent applications were aimed at eliminating the flaws in the process. Having registered applications for the production of aluminium by an electrolytic method,

Hall went to Pittsburgh in September 1888 to negotiate the establishment of the Pittsburgh Reduction Company (PRC) – the predecessor of Alcoa. The owners immediately began the construction of the plant, which had been producing 22–23 kg of aluminium per day by November 1888. The electrolytic cells were small cast iron baths (cathode casing) with the dimensions of $60 \times 40 \text{ cm}$ and a depth of 50 cm, lined inside with carbon plates 75 mm thick and containing up to 90–136 kg of electrolyte (figure) [15]. The electrolyte level was about 15 cm with a cryolite ratio $\text{NaF}/\text{AlF}_3 = 1$.

Eight cylindrical carbon anodes (8 cm in diameter) in two rows were suspended from above on copper current leads 1 cm in diameter. Each of the anodes received from 220 to 250 A; a total of 1800 A of direct current was supplied to the reduction cell. The soles of the anodes were kept from the bottom at a pole-to-pole distance (PPD) of 1.3–2.6 cm, but the voltage was maintained at about 8 V. To reduce the consumption of fluorine salts and to protect the anodes from oxidation, carbon powder (covering material) was poured on the electrolyte surface with a layer of 2–3 cm. The productivity of such electrolytic cells was up to 12 kg Al/day with an anode consumption of 1 kg and an energy consumption of about 30 kWh per 1 kg of Al produced. The service life was about several weeks, during which the electrodes were passivated by precipitation causing unstable operation of the electrolytic cells.

The above-described scheme exhibits several inconsistencies related to current density, electrolyte level and cell voltage. For example, if it is assumed that all the current passed between the lower plane of the anode and the cell floor, the anode current density at the bottom was about $5\text{--}6 \text{ A/cm}^2$ and the cathode current density ranged from 0.75 to 1.0 A/cm^2 . At the same time, it is obvious that not only the cell floor could serve as the cathode surface, but also the carbon walls of the side lining, the distance from the anodes to which was about 8 cm. This partly explains the increased operating voltage; however, the actual anode and cathodic current densities are difficult to estimate. On the other hand, if the electrolyte level did not exceed 15 cm, its amount would have corresponded

Charles Hall's patents obtained during 1886–89
 Патенты Ч. Холла в период 1886–1889 гг.

No. pp	Application No./date	Patent No. *	Patent name
1	207601 / 07.09.1886	400766	Process of reducing aluminium by electrolysis
2	226206 / 02.02.1887	400664	Process of reducing aluminium from its fluoride salts by electrolysis
3	282954 / 17.08.1888	400665	Manufacture of aluminium
4	282955 / 17.08.1888	400666	Process of electrolyzing crude salts of aluminium
5	286034 / 09.21.1888	400667	Process of electrolyzing fused salts of aluminium

*All the patents were registered simultaneously on April 2, 1889 / Все патенты зарегистрированы одновременно 2 апреля 1889 г.



Pittsburgh Reduction Company cells in 1888 (Pittsburgh, Smallman Street plant) [16]
Электролизеры Pittsburgh Reduction Company 1888 г. (Pittsburgh, Smallman Street plant) [16]

to lower values of about 50–55 kg, rather than 90–136 kg. In other words, it is obvious that the first industrial electrolytic cells, having a cell depth of 50 cm, comprised a liquid aluminium cathode. Then it becomes possible to explain the increased consumption of anodes and a rather high daily output of aluminium, as well as the decision of stockholders in 1990 to expand the plant switching to larger electrolytic cells of 10 kA.

Why are we discussing Hall's laboratory tests in such detail, as well as his patents for the method of electrolytic production of aluminium and the first steps of the aluminium industry? First, at the stage of making a decision to implement his experiments in practice, Charles Hall took advantage of his patents and chose the option of an electrolysis cell with an anode in the centre of the bath and the cathodic surface of the crucible. In all of his five patents, this construction design was not the major feature and coincided exactly with Héroult's patent decisions. Secondly, even before the introduction of the method into practice, in 1888, Hall, PRC

stockholders and factory specialists abandoned the idea of using solid cathodes, which failed to ensure stable operation of electrolytic cells. It was with this collective stockholder decision that the Pittsburgh Reduction Company laid the foundations for the modern aluminium production process. In this regard, and thirdly, the development of a new method of the electrolysis of cryolite-alumina melts using a uniform surface of liquid aluminium as the cathode, revised electrolyte compositions and other technical and design solutions gave aluminium companies grounds to restrict access to their plants to outside specialists. In the late 19th and early 20th centuries, European and American aluminium plants became the most closed industrial enterprises inaccessible for visiting [17].

20th CENTURY

In the subsequent pre-war and post-war years, some attempts to return to the use of solid cathodes were made [18, 19]. These attempts failed at the stage of obtaining patents, since

carbon electrodes are not wettable with aluminium. Interest in cell designs using solid cathodes revived in the 1950s after the publication of Ch.E. Ransley's patents on the use of borides and carbides of refractory metals, which are wettable with aluminium and resistant to aggressive working environments, as cathode materials [20–22]. Although these inventions have not found commercial application, numerous studies were carried out to employ the unique properties of products and coatings based on carbides and borides of refractory metals in the designs of conventional aluminium reduction cells and new generation reduction cells with drained cathodes and vertically arranged electrodes [23–30]. Investigations of compact products made of titanium diboride (TiB_2) or its composites demonstrated not only their effectiveness but also their vulnerability associated with increased cracking as a result of inter-granular corrosion and a relatively rapid wear.

When developing a technology for using vertically arranged inert electrodes, researchers faced a more serious problem (which was familiar at the time to Charles Hall). This problem was associated with aluminium-wetted cathodes based on titanium diboride, rather than with inert anodes. The work of C.W. Brown published in 1998 [31] reported the results obtained by Theodor Beck, whose first series of experiments with the electrolysis of low-melting potassium-sodium electrolytes with increased alumina content at 700°C resulted in passivation of TiB_2 -cathodes with a grey or white sediment. Aluminium was found in the cell in the form of small spheres. The author found these results perplexing.

The following series of experiments was undertaken to elucidate the behaviour of TiB_2 -based cathodes at 750°C in low-temperature electrolytes ($\text{NaF}:44\%\text{AlF}_3$ and $\text{NaF}:\text{AlF}_3+\text{KF}:\text{AlF}_3+4\%\text{LiF}$). Round metal-alloy anodes were placed at the bottom of the cell made of corundum with a volume of 500 ml. Cathodes of two types were placed above the anodes in the cell. The first type was a pure hot-

pressed TiB_2 produced from a tank armour plate supplied by Ceradyne. The second type was a composite with graphite, designated as TiB_2 -10%G, provided by the Great Lakes Carbon company. For each test, fresh diamond-polished cathode specimens were used. The current density, cathode and electrolyte compositions were varied. The anode current density was maintained within 0.13 – 0.5 A/cm^2 . The tests were carried out at three cathode current densities by changing the cathode surface area – 0.08 A/cm^2 , 0.3 A/cm^2 and 1.2 A/cm^2 , depending on which the experiment lasted for 320, 80 and 20 minutes, respectively.

After all the experiments, the cathode was found to be covered with a thin layer of Al, but there was always a grey or black electrolyte layer on top of the aluminium. This sediment was of two types. The first type was present only on TiB_2 -G cathodes operating at high current densities. This grey and hard residue could not be removed from the electrode surface. Visually, aluminium was absent on these cathodes, but energy dispersive spectroscopy discovered a thin layer of aluminium between the cathode and the deposit, which consisted of cryolite. All other cathodes had a mixed, relatively soft layer of grey electrolyte with black inclusions and aluminium.

Beck reported additional observations, according to which the formation of sediments decreased at low current densities and increased alumina concentrations. No residue was formed at temperatures above 800°C . Based on the experimental results and these observations, it was concluded that the cathodes passivated due to insufficient dissolution of aluminium oxide.

However, the results of the conducted EDS analysis, i.e. the presence of a thin layer of aluminium between the cathode and the passivated deposit, may indicate the cathode operation at the limiting current densities in terms of aluminium and the potential shift up to the values of the decomposition voltage of the electrolyte components:



It should be noted that preliminary polishing of cathode samples gives a short-term effect, since an intercrystalline oxide phase formed during manufacture and/or heating is always present on both the surface and in the bulk. Upon interaction with the electrolyte, these oxides, oxyborides and oxycarbides dissolve followed by the formation of progressive physical surface heterogeneity. Therefore, Beck's observations can be interpreted from the standpoint of uneven distribution of the current and potential over the cathode surface. This non-uniform distribution decreases with a decrease in the total load on the electrodes, since an increase in temperature decreases the viscosity of the melt, thus removing restrictions on mass transfer.

When developing a technology of new generation reduction cells comprising vertical electrodes at the turn of the 1990s and 2000s, specialists at the Alcoa research centre noted the emergence of problems associated with the operation of cathodes from hot-pressed TiB_2 , rather than with the operation of low-consumable anodes. Unfortunately, the information from Alcoa was very limited and not informative [32]. Although the essence of the problem was not disclosed, the company reported on the presence of oxides in dense cathode products, which appeared at the stage of their manufacture, in the process of firing and starting the bath. It seems obvious that the problem lies not only in the high cost of titanium diboride products, but also in the peculiarities of cathodic processes on solid polycrystalline cathodes during the electrolysis of cryolite-alumina melts.

21st CENTURY

A more informative report was issued in 2005 by the Northwest Aluminium Technologies (NAT) on a 4–5 year experience of working on the same issue [33]. Metallic Cu-Ni-Fe anodes and TiB_2 cathodes were used in 200 to 5000 A electrolytic cells operating at a current density from 0.25 to 1 A/cm² in experiments lasting for 5–300 h. Standard problems were noted for TiB_2 cathodes, with the major problems concerning

the formation of sediments and passivation of the cathode surface at current densities of above 0.5 A/cm². Among the underlying reasons for these phenomena were mentioned the porous structure and presence of titanium oxides on the surface and in the bulk of the cathodes. The conclusion was made that hot-pressed cathodes made of titanium diboride were unsuitable for commercial use. In a postscript, Dr Bradford, the author of the NAT report, concludes: "Therefore, the most important condition for the successful operation of the system under development is the creation of cathodes suitable for long-term use in the technology of inert anode with low-temperature electrolytes."

A study published in 2007 [34] investigated the behaviour of inert anodes in a conventional electrolyte at 960°C and in low-temperature electrolytes $KF-AlF_3$ and $K_3AlF_6-Na_3AlF_6-AlF_3$ at 700–800°C. It was observed that the electrolysis was more stable in a readily-fusible electrolyte at 800°C, whereas significant voltage fluctuations (5.96–19.6 V) associated with the formation of a passivating sediment on the cathode were noted at 700°C. Similar observations were recorded at the Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences [35].

Low-temperature electrolysis with the use of $KF-AlF$ potassium electrolytes, CR = 1.3 and the working temperature of 700–770°C was investigated in² [36]. In some experiments, sodium fluoride was added to a potassium electrolyte. The concentration of alumina was maintained at the level of 4.5–5.5 %wt. All the experiments used electrolytic cells operated at 20 and 100 A with vertically arranged anodes and cathodes. Aluminium bronze was used as the anode, while the cathode was composite TiB_2-C . The distance between the cathode and anode plates was 2 cm. The proposed experimental cell implied the use of a vertical anode in the centre and two cathodes on the sides. According to the scheme, all electrodes were of the same size in section. The paper specified the size of the anodes, as well as the anode and cathode densi-

²Ткачева О.Ю. Low-temperature electrolysis of alumina in fluoride melts: Dissertation for the degree of Dr. Sci. in Chemistry: 05.17.03. Ekaterinburg, 2013. 24 p. / Ткачева О.Ю. Низкотемпературный электролиз глинозема во фторидных расплавах: дис. ... д-ра хим. наук: 05.17.03. Екатеринбург, 2013. 245 с.

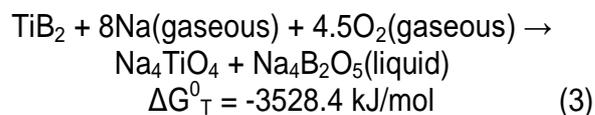
ties of 0.45 A/cm and 0.52 A/cm, respectively. The size of the cathodes and the approach used for maintaining the electrode load were not given, thus hampering the analysis of the published data. A 1.5-litre corundum crucible was used as a container. During the electrolysis, the voltage on the bath, current, temperature, anode and cathode potentials were recorded using the Labview software at a rate of 1 measurement per second. During the entire experiment, the voltage increased from 5.5 to 8.5 V. Even the disconnection of the current (for the dissolution of the anode film as stated) did not lead to a decrease in voltage. After the experiment, the cathode was found to be covered with a thick layer of a grey substance (cake), which showed the presence of only KAlF_4 and K_3AlF_6 according to X-ray analysis. No aluminium oxide was found. According to the authors [36], the sediment on the cathode was to be associated with the enrichment of the near-electrode region with potassium fluoride, the increase in CR and, as a result, its melting temperature. Eventually, the electrolyte "freezes" on the cathode surface, thus passivating it. Therefore, an increase in electrolysis temperature removes the sediment from the cathode and normalizes the process.

In our opinion, an increase in temperature is capable of melting the sediment on the cathode formed for other reasons as well, e.g., due to a decrease in the electrolyte viscosity and an improved hydrodynamics of the melt in the polar space. Moreover, the cathode process in these experiments, considering the proposed scheme (anode in the centre, cathodes on the sides), took place at reduced current densities. In addition, all the parameters – the process temperature, the solubility of aluminium oxide and the electrolysis stability – were directly proportional.

Similar results were presented in 2018 following a series of large-scale laboratory studies of electrolysis in a cell with vertical electrodes [37]. Inert ceramic materials were used as anodes; cathodes were prepared from composite $\text{TiB}_2\text{-C}$. For a molten environment, a low-floating electrolyte KF-NaF-AlF_3 was prepared by mixing the corresponding quantities of sodium cryolite, potassium fluoride and alumina of industrial varieties. After the mixture had been melted, the KF content was about 20%wt; the ratio

$[\text{NaF}]+[\text{KF}]/[\text{AlF}_3]$ was 1.4–1.5; and the alumina content was 4.2–5.3%wt. In experiments with a current density of 0.07 A/cm², no aluminium on the cathode was observed. In experiments with a current density ranging from 0.15 to 0.26 A/cm² and stable electrolysis parameters, a dense layer of aluminium was formed on the wetted surface. However, when the current density was raised above 0.4 A/cm², the process destabilized, leading to a dramatic decrease in current efficiency. A layer of electrolyte components and aluminium carbide was formed on the cathode. The authors [37] reasonably explained this situation with a local increase in the cryolite ratio in the near-electrode layer due to an increase in the polarization of the cathode, under which values the discharge of Na and K ions was intensified.

However, sodium and potassium in atomic form are capable of interacting with the cathode material followed by micro-degradation of its surface. This was confirmed by the work [38], which examined the interaction between Na and hot-pressed cylindrical samples of TiB_2 in an installation for thermogravimetric analysis. TiB_2 showed a high reactivity with regard to gaseous Na. The weight gain after a 72-hour exposure to sodium vapours was 0.26 and 0.43 wt% at 750°C and 850°C, respectively. At the same time, visually, the sample had no clear changes in size, although changing its colour from greyish to black. According to EDS analysis, the surface black layer of 30–40 microns thick consisted mainly of Ti, Na and O. Noteworthy, the dense phase in the titanium diboride surface layer was sodium borate with the formula NaBO_2 , while the upper porous phase consisted of sodium oxides and titanium. This means that Na and oxygen are involved in the reaction with TiB_2 . According to the authors, this process under the experimental conditions (750°C) takes place according to the following scheme:



The authors [38] noted that, in an industrial electrolytic cell, the formed liquid borate phases would dissolve in the electrolyte, thus exposing

the new surface to the next decomposition cycle. This would lead to a continuous degradation of the cathode. If these effects were limited solely to the cathode surface corrosion, which might be acceptable for the commercial use of titanium-diboride-based electrodes, the development of inert cathode technology could be considered a success. However, the problem of surface corrosion and the associated increased physical and chemical heterogeneity of the cathode surface can be a serious obstacle to ensuring a normal process of electrolysis.

CONCLUSION

On the basis of the presented analysis of available publications, we attempted to establish a functional connection between various electrolysis parameters and the state of the electrode surface in the context of historical evolution of this research field. During the development of electrolysis of cryolite-alumina melts using solid electrodes, both contemporary researchers and 19th-century scientists observed and sought to overcome the same problems, i.e.

increased consumption and dissolution of anodes, passivation of cathodes and disruption of the electrolytic process. In the 19th century, this problem was solved by the use of liquid cathodes and horizontally arranged electrodes. Despite the high production costs, particularly electricity, this approach was justified by an extremely high demand in aluminium. Therefore, in the 20th century, researchers aimed to improve this method by increasing the unit capacity of electrolytic cells. In today's world, with its severe environmental constraints and threatening energy shortages, a return to the origins of the aluminium industry seems possible. It is hoped that all the problems of electrolysis on solid electrodes could be solved by accumulated knowledge, new materials and automated technological procedures. This requires additional theoretical investigations and experimental studies, which will be described in the following parts of the article devoted to the specific features of electrolysis using solid electrodes – reactive and inert cathodes and anodes.

References

1. Solheim A. Inert anodes – the blind alley to environmental friendliness? *Light metals*. 2018;1253–1260. http://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_164
2. Gorlanov ES. Electrolysis of cryolite-alumina melts on solid cathodes. In: *XI Mezhdunarodnyj kongress «Cvetnye metally i mineraly» i XXXVII Mezhdunarodnaya konferenciya «IKSOBA»: sbornik dokladov = XI International Congress "Non-ferrous Metals and Minerals" and XXXVII International Conference "IKSOBA": Collected reports*. 16–20 September 2019, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2019, p. 275–288. (In Russ.)
3. Gorlanov ES. Features of solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(2):356–366. (In Russ.) <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-356-366>
4. Héroult PLT. *Procédé électrolytique pour la préparation de l'aluminium*. Patent FR, no. 175711; 1886.
5. Hall CM. *Process of Reducing Aluminum by Electrolysis*. Patent US, no. 400766; 1889.
6. Hall CM. *Process of reducing aluminium from its fluoride salts by electrolysis*. Patent US, no. 400664; 1889.
7. Hall CM. *Manufacture of aluminium*. Patent US, no. 400665; 1889.
8. Hall CM. *Process of electrolyzing crude salts of aluminium*. Patent US, no. 400666; 1889.
9. Hall CM. *Process of electrolyzing fused salts of aluminium*. Patent US, no. 400667; 1889.
10. Minet A. *The Production of Aluminium and its Industrial Uses. First edition*. London: Chapman & Hall; 1905, 266 p.
11. Ibl N. Current Distribution. In: *Comprehensive Treatise of Electrochemistry*. Vol. 6. *Electrodeposition: Transport*. Eds. by E. Yeager J.O'M. Bockris, B.E. Conway, S. Sarangapani. New York: Plenum Press; 1983, p. 239–315. Available from: https://books.google.ru/books/about/Electrodeposition_transport.html?id=aN-FAAAAIAAJ&redir_esc=y [Accessed 9th August 2020].
12. Newman J, Thomas-Alyea KE. *Electrochemical systems*. 3rd ed. John Wiley and New Jersey. Hoboken: John Wiley & Sons; 2004, 647 p.
13. Gamburg YuD, Zangari G. Theory and Practice of Metal Electrodeposition, 2015. 441 p. (Russ. ed.: *Teoriya i praktika elektroosazhdeniya metallov*. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2015, 441 p.)
14. Baraboshkin NA. *Electrocrystallization of metals from molten electrolytes*. Moscow: Nauka; 1976, 279 p. (In Russ.)
15. Richards JW. Aluminium: its history, occurrence, properties, metallurgy and applications, including its alloys. Third edition. London; 1896, 666 p.
16. Laparra M. The aluminium false twins. Charles martin hall and paul héroult's first experiments and technological options. *Journal for the History of Aluminium*. 2012;48:85–105.

17. Fedot'ev PP. *The current state of the chemical and electrochemical industry on the continent of Europe: monograph*. Sankt-Peterburg: Tipolitografiya Shredera; 1907, 229 p. (In Russ.)
18. Griswold T. *Electrolytic cell*. Patent US, no. 1070454; 1913.
19. Johnson AF. *Method of producing aluminum*. Patent US, no. 2480474; 1949.
20. Ransley CE. *Improvements in or relating to Electrolytic Cells for the Production of Aluminium*. Patent GB, no. 802905; 1958.
21. Ransley CE. *Producing or Refining Aluminum*. Patent US, no. 3028324; 1962.
22. Ransley CE. The Application of the Refractory Carbides and Borides to Aluminum Reduction Cells. In: *Extractive Metallurgy of Aluminum*. Vol. 2. Aluminium. New York: Interscience; 1962, p. 487–506.
23. Lewis RA. *Production of Aluminum*. Patent US, no. 2915442; 1959.
24. Dewey JL. *Refractory Lining for Alumina Reduction Cells*. Patent US, no. 3093570; 1963.
25. Joo LA, Tucker KW, McCown FE. *Titanium diboride-graphite composites*. Patent US, no. 4376029; 1983.
26. Hudson TJ. Cathode technology for aluminum electrolysis cells. *Light Metals*. 1987;321–325.
27. Gessing AJ, Wheeler DJ. Screening and evaluation methods of cathode materials for use in aluminum reduction cells in presence of molten aluminum and cryolite up to 1000°C. *Light Metals*. 1987;327–334.
28. McIntyre J, Mitchell DN, Simpson S. Performance testing of cathodic materials and designs in a 16 kA cell and a test bed. *Light Metals*. 1987;335–344.
29. Tucker KW, Gee JT, Shaner JR, Joo LA, Taberoux AT, Stewart DV, et al. Stable TiB₂ – graphite cathode for aluminium production. *Light Metals*. 1987;345–349.
30. Van Leeuwen TM. An aluminum revolution. In: *Equity Research, Credit Suisse First Boston*. Boston; 2000, 110 p.
31. Brown CW. The wettability of TiB₂-based cathodes in low-temperature slurry-electrolyte reduction cells. *JOM*. 1998;50(5):38–40.
32. Christini RA, Dawless RK, Ray SP, Weirauch DA. Phase III advanced anodes and cathodes utilized in energy efficient aluminum production cells. In: *Final Technical Progress Report for the Period 1998 August through 2001 July (Revised 2002 May 07)*. 92 p. Available from: <https://www.osti.gov/servlets/purl/794978> [Accessed 9th August 2020].
33. Bradford DR. Inert Anode Metal Life in Low Temperature Reduction Process. Final Technical Report for September 17, 1998 through March 31, 2005. 101 p. *National Technical Reports Library*. Available from: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE2006841153.xhtml> [Accessed 9th August 2020].
34. Wang Jia-wei, Lai Yan-qing, Tian Zhong-liang, Liu Yexiang. Effect of electrolysis superheat degree on anticorrosion performance of 5Cu / (10NiO - NiFe₂O₄) cermet inert anode. *Journal of Central South University of Technology*. 2007:768. <http://doi.org/10.1007/s11771-007-0146-5>
35. 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 cryolite. *Light Metals*. 2008:505.
36. 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 17th August 2020].
37. Bao Shengzhong, Chai Dengpeng, Shi Zhirong, Wang Junwei, Liang Guisheng, Zhang Guisheng. Effects of current density on current efficiency in low temperature electrolysis with vertical electrode structure. *Light Metals*. 2018:611–619. http://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79.
38. Wang Zhaohui, Friis J, Ratvik AP. Transport of Sodium in TiB₂ materials investigated by a laboratory test and dft calculations. *Light Metals*. 2018;1321–1328. http://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_173

Список литературы

1. Solheim A. Inert anodes – the blind alley to environmental friendliness? // *Light metals*. 2018. P. 1253–1260. http://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_164
2. Горланов Е.С. Электролиз криолитоглиноземных расплавов на твердых катодах // XI Междунар. конгр. «Цветные металлы и минералы» и XXXVII Междунар. конф. «ИКСОБА»: сб. докл. (г. Красноярск, 16–20 сентября 2019). Красноярск, 2019. С. 275–288.
3. Горланов Е.С. Особенности применения твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 356–366. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-356-366>
4. Patente no. 175711, France. Procédé électrolytique pour la préparation de l'aluminium / P. L-T. Héroult. Déposé 23.04.1886; publ. 01.09.1886.
5. Patent no. 400766, United States of America. Process of Reducing Aluminum by Electrolysis / Ch. M. Hall; no. 207601. Filed 9.07.1886; publ. 2.04.1889.
6. Patent no. 400664, United States of America. Process of reducing aluminium from its fluoride salts by electrolysis / Ch. M. Hall; no. 226206. Filed 2.02.1887; publ. 2.04.1889.
7. Patent no. 400665, United States of America. Manufacture of aluminium / Ch. M. Hall; no. 282954. Filed 17.08.1888; publ. April 2, 1889. 3 p.
8. Patent no. 400666, United States of America. Process of electrolyzing crude salts of aluminium / Ch. M. Hall; no. 282955. Filed 17.08.1888; publ. 2.04.1889.
9. Patent no. 400667, United States of America. Process of electrolyzing crude salts of aluminium / Ch. M. Hall; no. 286034. Filed 21.09.1888; publ. 2.04.1889.

10. Minet A. The Production of Aluminium and its Industrial Uses. First edition. London: Chapman & Hall, 1905. 266 p.
11. Ibl N. Current Distribution / in Comprehensive Treatise of Electrochemistry. Vol. 6. Electrode: Transport. Eds. by E. Yeager J.O'M. Bockris, B.E. Conway, S. Sarangan. New York: Plenum Press, 1983. P. 239–315. [Электронный ресурс]. URL: https://books.google.ru/books/about/Electrode_transport.html?id=aN-FAAAAIAAJ&redir_esc=y (09.08.2020).
12. Newman J., Thomas-Alyea K.E. Electrochemical systems. 3rd ed. John Newman and New Jersey. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. 647 p.
13. Гамбург Ю.Д., Зангари Дж. Теория и практика электроосаждения металлов / пер. с англ. Ю.Д. Гамбург. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 441 с.
14. Барабошкин Н.А. Электрокристаллизация металлов из расплавленных электролитов. М.: Наука, 1976. 279 с.
15. Richards J.W. Aluminium: its history, occurrence, properties, metallurgy and applications, including its alloys. Third edition. London, 1896. 666 p.
16. Laparra M. The aluminium false twins. Charles martin hall and paul héroult's first experiments and technological options // Journal for the History of Aluminium. 2012. No. 48. P. 85–105.
17. Федотьев П.П. Современное состояние химической и электрохимической промышленности на континенте Европы: монография. СПб.: Тип.-литогр. Шредера, 1907. 229 с.
18. Patent no. 1070454, United States of America. Electrolytic cell / T. Griswold; Dow Chemical Company; no. 633320. Filed 15.06.1911; publ. 19.08.1913.
19. Patent no. 2480474, United States of America. Int. Cl. 204-67. Method of producing aluminum / Arthur F. Johnson; Reynolds Metals Company; no. 634903. Filed 14.12.1945; publ. 30.08.1949.
20. Patent 802905, Great Britain. Int. Cl. B23n. C22d. Improvements in or relating to Electrolytic Cells for the Production of Aluminium / C.E. Ransley; no. 1155/54. Filed 14.01.1955; publ. 15.10.1958.
21. Patent no. 3028324, United States of America. Int. Cl. 204-67. Producing or Refining Aluminum / C.E. Ransley; British Aluminium Company; no. 660994. Filed 23.05.1957; publ. 23.04.1962.
22. Ransley C.E. The application of the refractory carbides and borides to aluminum reduction cells // Extractive Metallurgy of Aluminum. Vol. 2. Aluminium. New York: Interscience, 1962. P. 487–506.
23. Patent no. 2915442, United States of America. Cl. 204-67. Production of Aluminum / R.A. Lewis; Kaiser Aluminum & Chemical Corporation; no. 549347. Filed 28.11.1955; publ. 1.12.1959.
24. Patent no. 3093570, United States of America. Int. Cl. 204-243. Refractory Lining for Alumina Reduction Cells / J.L. Dewey; Reynolds Metals Company; no. 847594. Filed 20.10.1959; publ. 11.06.1963.
25. Patent no. 4376029, United States of America. Int. Cl. C25B 11/04, C25C 3/12. Titanium diboride-graphite composites / L.A. Joo, K.W. Tucker, F.E. McCown; Great Lakes Carbon Corporation; No. 186181. Filed 11.09.1980; publ. 8.03.1983.
26. Hudson T.J. Cathode technology for aluminum electrolysis cells // Light Metals. 1987. P. 321–325.
27. Gessing A.J., Wheeler D.J. Screening and evaluation methods of cathode materials for use in aluminum reduction cells in presence of molten aluminum and cryolite up to 1000°C // Light Metals. 1987. P. 327–334.
28. McIntyre J., Mitchell D.N., Simpson S. Performance testing of cathodic materials and designs in a 16 kA cell and a test bed // Light Metals. 1987. P. 335–344.
29. Tucker K.W., Gee J.T., Shaner J.R., Joo L.A., Taberoux A.T., Stewart D.V., et al. Stable TiB₂ – graphite cathode for aluminium production // Light Metals. 1987. P. 345–349.
30. Van Leeuwen T.M. An aluminum revolution // Equity Research, Credit Suisse First Boston. Boston: 2000. 110 p.
31. Brown C.W. The wettability of TiB₂-based cathodes in low-temperature slurry-electrolyte reduction cells // JOM. 1998. Vol. 50. Issue 5. P. 38–40.
32. Christini R.A., Dawless R.K., Ray S.P., Weirauch D.A. Phase III advanced anodes and cathodes utilized in energy efficient aluminum production cells // Final Technical Progress Report for the Period 1998 August through 2001 July (Revised 2002 May 07). 92 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/794978> (09.08.2020).
33. Bradford D.R. Inert Anode Metal Life in Low Temperature Reduction Process. Final Technical Report for September 17, 1998 through March 31, 2005. 101 p / National Technical Reports Library [Электронный ресурс]. URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE2006841153.xhtml> (09.08.2020).
34. Wang Jia-wei, Lai Yan-qing, Tian Zhong-liang, Liu Yexiang. Effect of electrolysis superheat degree on anticorrosion performance of 5Cu / (10NiO - NiFe₂O₄) cermet inert anode // Journal of Central South University of Technology. 2007. P. 768. <http://doi.org/10.1007/s11771-007-0146-5>
35. 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 cryolite // Light metals. 2008. P. 505.
36. 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> (17.08.2020).
37. Bao Shengzhong, Chai Dengpeng, Shi Zhirong, Wang Junwei, Liang Guisheng, Zhang Guisheng. Effects of current density on current efficiency in low temperature electrolysis with vertical electrode structure // Light Metals. 2018. P. 611–619. http://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79
38. Wang Zhaohui, Friis J., Ratvik A.P. Transport of sodium in TiB₂ materials investigated by a laboratory test and DFT calculations // Light Metals. 2018. P. 1321–1328. http://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_173



INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgeniy S. Gorlanov,
Doct. Sci. (Eng.),
Deputy General Director of EXPERT-AL LLC,
86/A, Sredniy pr., V.O. Saint-Petersburg
199106, Russia;
✉ e-mail: gorlanove@yandex.ru

Contribution of the author

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

Conflict of interests

The author declares no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 08.10.20; approved after reviewing 11.11.2020; accepted for publication 17.12.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

Заявленный вклад автора

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.10.20; одобрена после рецензирования 11.11.2020; принята к публикации 17.12.2020.

Исследование двойного электрического слоя при сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли

© В.В. Ёлшин, Ю.Э. Голодков

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – изучение механизма сорбции тиокарбамидных комплексов золота активированными углями путем исследования свойств возникающего двойного электрического слоя. Для исследования двойного электрического слоя сорбционной поверхности углей был принят полярокондуктометрический метод, основанный на одновременном использовании поляризационных зависимостей на постоянном токе и кондуктометрических измерений на переменном токе. Показано, что сорбция тиокарбамидных комплексов золота происходит более интенсивно при катодных значениях потенциалов сорбента, а в отрицательной области от 0,05 до 0,2 В зависимость величины адсорбции от потенциала имеет фактически линейный характер. Абсолютное значение сорбции тиокарбамида золота при отрицательном потенциале сорбента 0,2 В совпадает с максимальными значениями тока поляризации по постоянному току и проводимости по переменному току. Электрохимическая реакция восстановления тиокарбамидных соединений приводит к образованию нейтральных молекул тиокарбамида, поэтому, вероятно, наблюдается осаждение золота на поверхности углеродного сорбента в металлическом виде. Нейтрализация активных соединений в двойном электрическом слое создает условия к тому, что к отрицательно заряженной поверхности сорбента активизируется доступ положительно заряженных ионов золота. Для анодной области поляризации сорбента характерны максимальные значения сорбции ионов золота при положительном потенциале 0,2 В, при этом должна быть перезарядка поверхности сорбента, т.к. в этой же области потенциала наблюдается максимальная проводимость по переменному току. Такие условия должны приводить к разрушению плотной части двойного электрического слоя и, следовательно, созданию благоприятных условий для сорбции. На основе проведенных исследований установлено, что на сорбцию тиокарбамидных комплексов золота активированными углями существенное влияние оказывает потенциал сорбента. Использование полярокондуктометрического метода исследования двойного электрического слоя позволяет объяснить особенности сорбции указанного соединения на активированных углях.

Ключевые слова: сорбция, активированные угли, тиокарбамидные комплексы золота, двойной электрический слой

Для цитирования: Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э. Исследование двойного электрического слоя при сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1337–1346. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346>

Studying electric double layer under sorption of gold on activated carbons from thiocarbamide solutions

Viktor V. Elshin, Yuri E. Golodkov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to research the mechanism of gold-thiocarbamide complex sorption by activated carbons by studying the properties of the resulting electric double layer. The study of the electric double layer of coal sorption surface is conducted using a polar conductometric method based on the simultaneous use of polarization dependences on direct current and conductometric measurements on alternating current. It is shown that the sorption of thiocarbamide complexes of gold occurs more intensively at the cathodic values of sorbent potentials. Dependence of the adsorption value on the potential is actually linear in the negative region from 0.05 to 0.2 V. The absolute value of gold-thiocarbamide sorption at the negative sorbent potential of 0.2 V coincides with the maximum values of the polarization current for direct current and conductivity for alternating current. The electrochemical reduction reaction of thiocarbamide compounds results in the formation of neutral thiocarbamide molecules, it might be the reason for gold deposition in a metallic form on the surface of the carbon sorbent. Neutralization of active compounds in the electric double layer creates conditions for the activation of positively charged gold ions directing to the negatively charged sorbent surface. The anodic region of sorbent polarization is characterized by the maximum values of gold ion sorption at the positive potential of

0.2 V. In this case the sorbent surface should be recharged, since in the same region of the potential the maximum AC conductivity is observed. Such conditions should lead to the destruction of the thick part of the electric double layer and, consequently, create favorable sorption conditions. The conducted studies allowed to derive a conclusion that the sorption of gold-thiocarbamide complexes by activated carbons is significantly influenced by the sorbent potential. The use of the polar conductometric method for studying the electric double layer makes it possible to explain the features of given compound sorption on activated carbons.

Keywords: sorption, activated carbons, gold-thiocarbamide complexes, electric double layer

For citation: Elshin VV, Golodkov YuE. Studying electric double layer under sorption of gold on activated carbons from thiocarbamide solutions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1337–1346. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346>

ВВЕДЕНИЕ

Поиск альтернативных способов выщелачивания золота из различных минеральных продуктов [1], золото-сурьмяных руд [2], упорных медно-золотых руд [3], хвостов флотации руды [4, 5] с помощью тиокарбамидных растворов остается актуальным на протяжении ряда десятилетий. Авторы [6] разработали процесс биоокисления и двухступенчатого выщелачивания тиомочевинной для извлечения золота из тугоплавкого сульфида золото-содержащих руд и концентров, что, по их мнению, является более экологичным и эффективным методом, чем цианирование. А в последнее время тиокарбамидное выщелачивание золота предлагается применять для переработки печатных плат отработанных мобильных телефонов [7, 8]. Вопросам сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли также посвящено много работ [9–11].

К параметрам, которые характеризуют строение двойного электрического слоя (ДЭС), относятся емкость и положение точки нулевого заряда, поэтому анализ из влияния на формирование ДЭС, в частности при сорбции благородных металлов активными углями, важен с позиции понимания механизма процесса.

Сложившиеся современные представления об электрохимической природе процесса адсорбции электролитов на активированных углях лежат в основе термодинамической теории [12]. Было показано, что во многих случаях такое представление двойного электрического слоя имеет ряд преимуществ пе-

ред теорией Штерна¹ и позволяет полнее раскрывать экспериментальные данные. Поэтому рассмотрение строения границы двойного электрического слоя должно основываться, прежде всего, на этой теории.

При равновесном протекании процесса подаваемое к электроду количество электричества ($Q - Q_0$) расходуется на изменение заряда двойного электрического слоя ($q - q_0$) и поверхностной концентрации адсорбированного газа i ($F_{Ai} - F_{Ai}^0$), определяется по формуле (1):

$$\Delta Q = Q - Q_0 = (q - q_0) + (F_{Ai} - F_{Ai}^0). \quad (1)$$

Применимость такого соотношения для описания состояния поверхности электрода на границе с электролитом была экспериментально подтверждена на примере активированных углей [13].

Для случая адсорбции кислорода уравнение Гиббса имеет следующий вид²:

$$\partial G = -\Gamma_o \cdot \partial \mu_o - \Gamma_o^- \cdot \partial \mu_o^-,$$

где Γ_o и Γ_o^- – величины адсорбции атомов и ионов кислорода Гиббса, а μ_o и μ_o^- – их химические потенциалы.

Из выражения (1), учитывая, что

$$\partial F_r = -\frac{\partial \mu_o}{F},$$

получим

¹Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высш. шк., 1969. 512 с.

²Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высш. шк., 1983. 400 с.

$$\partial G = -Q \cdot \partial F_r - \frac{q}{F} \cdot \partial \mu_o^-.$$

Величина $\left(\frac{\partial Q}{\partial F_r}\right) \cdot \mu_o^-$ представляет собой общую поляризационную емкость электрода ($C_{пол}$), а величина $\left(\frac{\partial q}{\partial F_r}\right) \cdot \mu_o^-$ – емкость двойного электрического слоя ($C_{д.с}$). Значение $C_{пол}$ может быть определено по наклону кривой заряжения. Поскольку

$$C_{д.с} = \frac{C_{пол} \cdot F}{2,3RT} \cdot \left(\frac{\partial F_r}{\partial pH}\right)_Q,$$

то можно рассчитать значение $C_{д.с}$, зная величину $\left(\frac{\partial F_r}{\partial pH}\right)_Q$, называемую изоэлектрическим сдвигом потенциала. Она может быть найдена экспериментально, если использовать раствор с другой величиной pH.

Для практических целей при измерении емкости двойного электрического слоя, принимая в первом приближении его в виде конденсатора, часто прибегают к соотношению:

$$U = R \cdot I + \frac{1}{C_{д.с}} \int I \cdot \partial t,$$

где U – напряжение цепи; I – сила тока; R – сопротивление цепи; $C_{д.с}$ – емкость двойного слоя исследуемого электрода; t – время.

Таким образом, предполагая, что процесс сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли основывается на электрохимической природе адсорбционных сил, исследование электрохимических взаимодействий на границе раздела твердой и жидкой фазы на поверхности сорбента представляется вполне актуальным и перспективным научным направлением.

Цель исследования заключается в изучении механизма сорбции золота на активированные угли из тиокарбамидных растворов

путем исследования свойств возникающего двойного электрического слоя.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования двойного электрического слоя был предложен полярокондуктометрический (ПК) метод, который основан на одновременном использовании поляризационных зависимостей на постоянном токе и кондуктометрических измерений на переменном токе. Разработке данной методики исследований, включая аппаратное оснащение, посвящен ряд авторских работ [14, 15].

Структурная схема установки, реализующая ПК-метод измерения параметров двойного слоя, приведена на рис. 1.

Принцип действия ПК-метода основан на следующем: рабочие электроды (РЭ) РЭ₁ и РЭ₂, изготовленные из исследуемого сорбента (ИПИ-Т) [16, 17], одинакового размера (1x2 мм) подключаются к источникам постоянного и переменного напряжения (ИППН) через согласующий трансформатор Тр. ИППН задает потенциал РЭ₁ и РЭ₂ относительно вспомогательного электрода (ВЭ) через среднюю точку выходной обмотки согласующего трансформатора Тр. Так как рабочие электроды выполнены из одного и того же материала и имеют примерно одинаковые размеры, то по постоянному току они будут иметь один и тот же потенциал и, следовательно, одинаковое строение двойного слоя у поверхности рабочих электродов. По переменному току – это разные электроды, так как подключены к концам выходной обмотки согласующего трансформатора. Таким образом, поляризация постоянным током, задавая потенциал рабочим электродом, формирует двойной слой на них, а поляризация переменным током позволяет судить о строении двойного слоя, так как при прочих равных условиях (материал электродов, их потенциал, состав раствора и его температура) величина переменного тока будет зависеть от строения двойного слоя на рабочих электродах. При изменении потенциала рабочих электродов меняется строение двойного слоя и, естественно, величина переменного тока между рабочими электродами.

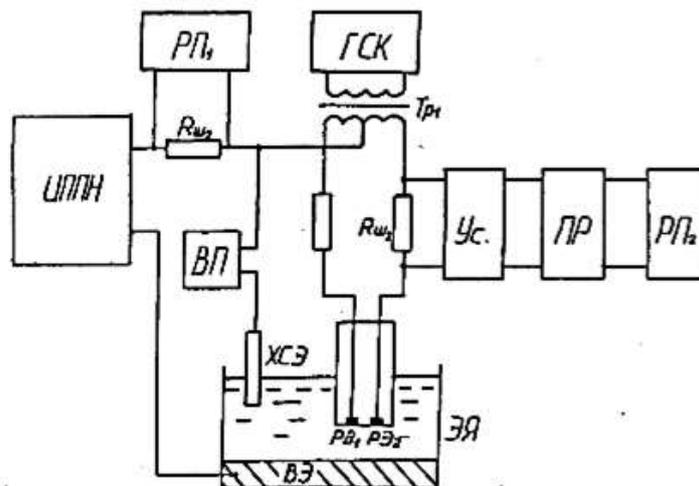


Рис. 1. Структурная схема полярокондуктометрической установки: ИППН – источник постоянного поляризующего напряжения; ГСК – генератор синусоидального напряжения; РП₁ – регистрирующий прибор для записи поляризационной зависимости (в координатах $\tilde{I} - \varphi_{\text{пост.тока}}$); РП₂ – регистрирующий прибор для записи кондуктограммы (в координатах $\tilde{I} - \varphi_{\text{пост.тока}}$); Тр₁ – согласующий трансформатор; R_{ш1,2} – калиброванные сопротивления; Ус – усилитель переменного тока; Пр – преобразователь сигнала, \tilde{I} ; ВП – высокоомный вольтметр для измерения потенциала рабочих электродов по постоянному току; ХСЭ – хлор-серебряный электрод сравнения; РЭ₁ и РЭ₂ – рабочие электроды из исследуемого активированного угля; ВЭ – вспомогательный электрод из импрегнированного графита; ЭЯ – электролитическая ячейка

Fig. 1. Structural diagram of a polar conductometric setup: ИППН – source of constant polarizing voltage; ГСК – sinusoidal voltage generator; РП₁ – device recording polarization dependence (in $\tilde{I} - \varphi_{\text{dc current}}$ coordinates); РП₂ – device recording a conductogram (in $\tilde{I} - \varphi_{\text{dc current}}$ coordinates); Тр₁ – matching transformer; R_{ш1,2} – calibrated resistances; Ус – AC amplifier; Пр – signal converter, \tilde{I} ; ВП – high-resistance voltmeter for measuring the potential of working electrodes for direct current; ХСЭ – silver chloride reference electrode; РЭ₁ and РЭ₂ – working electrodes from the activated carbon under investigation; ВЭ – auxiliary electrode made of impregnated graphite; ЭЯ – electrolytic cell

Постоянный ток поляризации, протекая по калиброванному сопротивлению R_{ш1}, создает на нем падение напряжения, которое фиксируется регистрирующим прибором РП₁. Переменный ток, протекая по сопротивлению R_{ш2}, создает на нем падение напряжения, которое усиливается усилителем, преобразуется преобразователем и регистрируется прибором РП₂.

ИППН способен изменять потенциалы рабочих электродов в пределах от +2 до -2 В как в стационарном, так и в динамическом режимах в диапазоне скоростей 0,1–1,0 В/мин.

Генератор синусоидальных колебаний обеспечивает питание рабочих электродов переменным током в пределах 5–50 мВ в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц.

РЭ₁ и РЭ₂ из активного угля ИПИ-Т готовили следующим образом: относительно

крупные образцы сорбента обрабатывали до размеров 3x3 мм (2 шт); один из торцов электродов омеднялся и к нему припаивали вывод; электроды вставляли в торцевую часть корпуса на расстоянии 3–4 мм друг от друга и заливали эпоксидной смолой таким образом, чтобы из эпоксидной заливки выступала только плоскость электродов.

Электролитическая ячейка была выполнена из стекла объемом 250 мл. В донную часть стакана помещали вспомогательный электрод (ВЭ) размером 16–20 см² из импрегнированного графита, залитого до верхней торцевой плоскости эпоксидной смолой для изоляции вывода. Ячейку термостатировали.

Полярокондуктометр настраивали на следующие параметры:

– диапазон поляризации рабочих электродов постоянным током в катодную и анодную области поляризации от -1 до +1 В;

- частота переменного тока 1000 Гц;
- амплитуда переменного тока на рабочих электродах 50 мВ;
- скорость развертки поляризующего напряжения 0,2 В/мин;
- температура растворов 20°C.

После настройки полярокондуктометр включали в работу и снимали пять последовательных полярокондуктометрических кривых по данным регистрирующих приборов (РП) РП₁ и РП₂. Далее строили графики зависимостей постоянного и переменного токов от потенциала рабочих электродов. Кроме этого, на данные графики наносили зависимость сорбции соответствующих ионов благородных металлов от потенциала поляризации. Такое совмещение графиков позволяет, по мнению авторов, прояснить зависимость сорбции благородных металлов из того или иного солевого раствора от условий формирования двойного электрического слоя и реакций, протекающих на поверхности рабочих электродов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования сорбции ионов золота из тиокарбамидных растворов применяли следующий состав растворов: концентрация тиомочевины – 7%; концентрация золота $[\text{Au}(\text{Thio})_2]^+$ – 100 мг/дм³; pH = 1.

Результаты исследований приведены на рис. 2.

Кривая 5 представляет процесс сорбции ионов золота в тиокарбамидном растворе на электродах из активированного угля в зависимости от потенциала этого электрода. Данный график указывает на большую чувствительность сорбции ионов золота к потенциалу электрода. Так, в районе потенциала от -0,2 до -0,25 В можно отметить первый пик сорбции (увеличение сорбции на 50% по отношению к минимуму сорбции). Второй пик увеличения сорбции ионов золота наблюдается в районе потенциала +0,2 ÷ +0,25 В (увеличение на 25% от минимума). Сравнивая кривую сорбции золота с поляризацион-

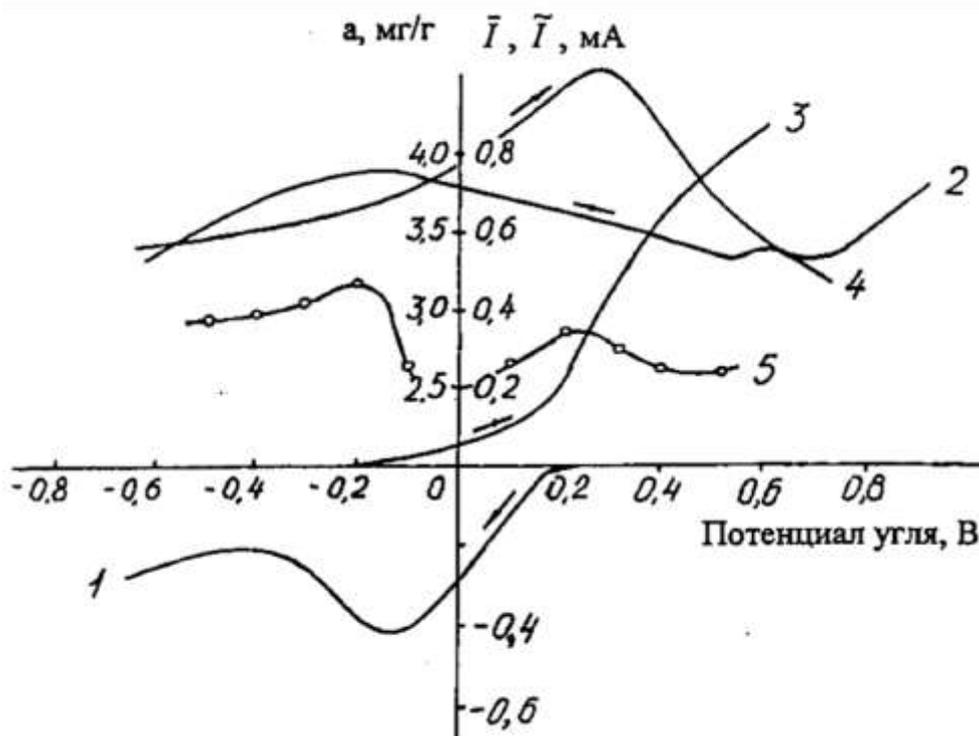
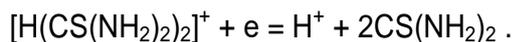
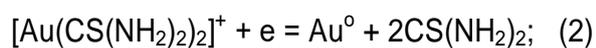


Рис. 2. Потенциодинамические кривые изменения постоянного (1, 3) и переменного (2, 4) токов и зависимость сорбции ионов $[\text{Au}(\text{Thio})_2]^+$ (5) от потенциала активного угля (стрелки на кривых указывают направление изменения потенциала)

Fig. 2. Potentiodynamic curves of constant (1, 3) and alternating (2, 4) current variation and the dependence of ion sorption $[\text{Au}(\text{Thio})_2]^+$ (5) on the potential of active carbon (arrows on the curves indicate the direction of potential change)

ными кривыми (кривые 1 и 3) и с кривыми проводимости по переменному току (кривые 2 и 4), можно отметить следующие закономерности: поляризационная кривая 1 показывает, что по мере сдвига от потенциала рабочих электродов +0,2 В в катодную область имеют место процессы восстановления. С потенциала рабочих электродов -0,15 В начинаются диффузионные ограничения тока восстановления, то есть устанавливается предельный ток, который сохраняется вплоть до потенциала -0,8 В. Это говорит о том, что в кислых растворах тиомочевины ($\text{pH} \leq 1$) имеется значительное количество катионных комплексов $[\text{H}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2]^+$ (учитывая величину предельного тока), которые при восстановлении обеспечивают протекание тока рабочих электродов в катодной области потенциалов. С учетом того, что определяющим состав раствора являются соединения тиокарбамида, реакцию восстановления [18–20] на рабочих электродах можно записать в следующем виде (2):

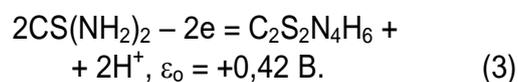


Стандартный потенциал реакции (2) равен +0,38 В, что хорошо согласуется с потенциалом восстановления ионов золота (см. рис. 2, кривую 1) в катодной области потенциалов (+0,18 В относительно электрода сравнения – хлорсеребряного электрода, наполненного насыщенным раствором КСl (НХСЭ)).

В приэлектродном слое рабочих электродов в результате реакции растет концентрация нейтральных молекул тиокарбамида, что должно отразиться на строении двойного слоя и на сорбционных свойствах угля. Действительно, если рассмотреть график изменения переменного тока (кривая 2) в цепи рабочих электродов, который характеризует проводимость границы электрод-электролит, то можно увидеть, что в области предельного тока поляризации (кривая 1) наблюдается пик проводимости, совпадающий с пиком сорбции (см. кривую 5) и пиком предельного тока (см. кривую 1) поляризационной кривой.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что пик сорбции ионов золота в катодной области поляризации сорбента в границах потенциалов -0,1 ÷ -0,25 В относительно НХСЭ обусловлен принудительной перестройкой жидкостной обкладки двойного слоя за счет электрохимической реакции восстановления иона тиокарбамида, что приводит к появлению дополнительной движущей силы сорбции ионов золота через новый двойной слой на поверхность сорбента.

Поляризация рабочих электродов в анодную область потенциала показывает на поляризационной кривой значительный рост тока (см. кривую 3) без установления его предельного значения вплоть до потенциала +0,8 В. Такое поведение поляризационного тока можно объяснить окислением на поверхности рабочих электродов основной составляющей раствора, а именно – молекул тиокарбамида по уравнению (3):



Особенностью реакции (3) на кривой поляризации является большое перенапряжение. Начало реакции окисления приходится на потенциал -0,22 В с незначительным ростом тока окисления – вплоть до потенциала +0,2 В, после чего отмечается значительный его рост в результате интенсивного образования дисульфида, являющегося продуктом окисления тиокарбамида. В этой области потенциалов разряд других ионов или молекул, в частности при разложении воды, маловероятен, так как среда имеет достаточно кислый характер ($\text{pH} = 1$).

Изменение величины переменного тока между рабочими электродами с ростом потенциала в анодную область имеет также ряд особенностей (см. кривую 4). С началом роста постоянного тока проводимость границы электрод-электролит также возрастает. Рост проводимости продолжается до потенциала +0,3 В, после чего начинает резко уменьшаться. Такое поведение проводимости границы электрод-электролит можно объяснить тем, что с началом реакции окисления тиокарбамида двойной слой у поверх-

ности углеродного сорбента начинает перестраиваться. В границах двойного слоя нейтральные молекулы тиокарбамида заменяются на анионы, причем с учетом знака заряда аниона можно предположить, что до потенциала +0,3 В (относительно НХСЭ) заряд поверхности сорбента отрицателен. При потенциале +0,3 В заряд поверхности углеродного сорбента, предположительно, переходит через нулевую точку, а затем приобретает положительную величину. В этой ситуации по мере роста потенциала рабочих электродов положительно заряженные ионы тиокарбамида вначале втягиваются в пределы двойного слоя, что обеспечивает увеличение проводимости по переменному току, а после прохождения точки нулевого заряда (+0,3 В относительно НХСЭ), наоборот, начинают выдавливаться за пределы двойного слоя, что ведет к снижению проводимости по переменному току.

Рассматривая характер сорбции тиокарбамида золота в анодной области поляризации сорбента, можно указать следующие особенности:

- при равном нулю потенциале относительно НХСЭ наблюдается минимум сорбции;
- с ростом потенциала сорбента от 0,0 до +0,2 В отмечается рост сорбции ионов золота, достигая максимума в диапазоне +0,2 ÷ +0,3 В;
- после потенциала +0,3 В начинается резкий спад сорбционной активности;
- величина пика сорбции в анодной области поляризации сорбента меньше пика сорбции в его катодной области.

Особенности сорбции тиокарбамидных комплексов золота в анодной области потенциалов с учетом изменения постоянного и переменного токов рабочих электродов можно объяснить следующим образом:

- при потенциале сорбента около ±0,0 В ток окисления молекул тиокарбамида очень мал, следовательно, продуктов окисления немного, что, вероятно, не способствует росту сорбции;
- с ростом тока окисления в двойном слое увеличивается количество продуктов окисления, а так как поверхность сорбента имеет отрицательный заряд ($\varphi_{ст} = -0,3$ В), что подтверждает рост проводимости по перемен-

ному току, то создаются условия для роста сорбции ионов $[Au(CS(NH_2)_2)_2]^+$;

– в области потенциалов сорбента +0,25 ÷ +0,3 В рост постоянного тока продолжается, следовательно, накапливаются и продукты реакции окисления, но ввиду перезарядки поверхности сорбента (проводимость по переменному току начинает падать) условия сорбции ионов $[Au(CS(NH_2)_2)_2]^+$ ухудшаются вследствие выдавливания положительно заряженных ионов от поверхности сорбента.

Таким образом, пик сорбции ионов $[Au(Thio)_2]^+$ в анодной области потенциалов сорбента приходится на диапазон +0,2 ÷ +0,3 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты исследования влияния потенциала сорбента на сорбцию тиокарбамида золота в растворах тиомочевины. Использование полярокондуктометрического метода исследования двойного электрического слоя позволяет объяснить особенности сорбции указанных комплексов на активированных углях и наметить пути интенсификации процесса в практических условиях.

Показано, что сорбция $[Au(Thio)_2]^+$ происходит более интенсивно при катодных значениях потенциалов сорбента, а в отрицательной области от 0,05 до 0,2 В зависимость величины адсорбции от потенциала имеет фактически линейный характер. Наибольшие значения сорбции тиокарбамида золота наблюдаются при отрицательном потенциале 0,2 В. При этом значении потенциала имеют максимальные значения предельный ток поляризации по постоянному току и проводимость по переменному току. Поэтому электрохимическая реакция восстановления тиокарбамидных соединений способствует нейтрализации молекул тиокарбамида и приводит к вероятному осаждению золота на поверхности углеродного сорбента в металлическом виде. Нейтрализация активных соединений в двойном электрическом слое создает условия к тому, что к отрицательно заряженной поверхности сорбента активизируется доступ положительно заряженных ионов золота и, как следствие, приводит к росту

массопереноса целевых компонентов. Для анодной области поляризации сорбента характерны максимальные значения сорбции ионов золота при положительном потенциале 0,2 В, при этом должна быть перезарядка поверхности сорбента, т.к. в этой же области потенциала наблюдается максимальная проводимость по переменному току. Такие условия должны приводить к разрушению плотной части двойного электрического слоя и, следовательно, созданию благоприятных

условий для сорбции.

Полученные результаты исследования электрохимической природы сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли раскрывают практические возможности интенсификации технологии сорбционного извлечения благородных металлов с помощью поляризационных воздействий на поверхность сорбента, поддерживая максимальные значения адсорбции тиокарбамида золота на протяжении всего процесса.

Список литературы

1. Barbosa-Filho O., Monhemius A.J. Thermochemistry of thiocyanate systems for leaching gold and silver ores // Precious Metals – 89: Proceedings of the Intern. Symposium «The Minerals, Metals and Materials Society» (Las-Vegas, 27 February – 2 March 1989). Warrendale, 1989. P. 307–339.
2. Reuter M.A. Gold Hydrometallurgy: theory and practice // Gold Bulletin Great Britain. 1999. No. 1. P. 36.
3. Джунушалиева Т.Ш., Борбиева Д.Б. Тиокарбамидное выщелачивание золота из упорных медно-золотых руд месторождения Долпран (КР) // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2015. № 3. С. 240–243.
4. Зинченко З.А., Тюмин И.А. Исследования по извлечению золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов Джиджикрусского месторождения тиомочевинной // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. № 10. С. 796–800.
5. Самихов Ш.Р., Зинченко З.А., Бобомуродов О.М. Изучение условий и разработка технологии тиомочевинного выщелачивания золота и серебра из руды месторождения Чоре // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. № 4. С. 318–324.
6. Yujie Guo, Xue Guo, Haiyan Wu. A novel bio-oxidation and two-step thiourea leaching method applied to a refractory gold concentrate // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 171. № 4. P. 213–221.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.05.023>
7. Li Jing-ying, Xu Xiu-li, Liu Wen-quan. Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones // Waste Management. 2012. Vol. 32. Issue 6. P. 1209–1212.
<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.026>
8. Manju G., Birendra B.A., Hidetaka K., Shafiq A. Recovery of gold and silver from spent mobile phones by means of acidothiurea leaching followed by adsorption using biosorbent prepared from persimmon tannin // Hydrometallurgy. 2013. Vol. 133. P. 84–93.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.12.003>
9. Zhang Hongguang, Ritchie I.M., La Brooy S. The adsorption of gold thiourea complex onto activated carbon // Hydrometallurgy. 2004. Vol. 72. No. 3-4. P. 291–301.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00182-8](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00182-8)
10. Войлошников Г.И., Войлошникова Н.С., Григорьева И.И., Бывальцев А.В. Сорбция золота активными углями из нецианистых растворителей и десорбция золота из насыщенного угля // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 7. С. 138–143.
11. Ларионов В.Р., Федосеев С.М. Сорбция золота из тиомочевинных растворов // Обогащение руд. 2003. № 6. С. 10–12.
12. Тарасевич М.Р. Электрохимия углеродных материалов. М.: Наука. 1984. 253 с.
13. Пономаренко Е.А., Фрумкин А.Н., Бурштейн Р.Х. Хемосорбция кислорода и адсорбция электролитов на активированном угле // Доклады АН СССР. 1963. Т. 149. № 5. С. 1123–1126.
14. Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э., Богйдаев С.А. Электрохимические исследования механизма сорбции золота и серебра активными углями // Цветные металлы. 2005. № 4. С. 32–35.
15. Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э., Тюрин Н.Г. Электрохимические взаимодействия при сорбции комплексных соединений золота и серебра активными углями // Цветные металлы. 1994. № 3. С. 25–27.
16. Дударев В.И., Ёлшин В.В., Ознобихин Л.М. Получение и исследование углеродных сорбентов с развитой пористой структурой // Журнал прикладной химии. 1999. Т. 72. Вып. 2. С. 319–321.
17. Помазкина О.И., Филатова Е.Г., Дударев В.И., Дударева О.В. Сорбция ионов железа(II) углеродными сорбентами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 2. С. 156–158.
18. Бобоев И.Р., Сельницын Р.С., Холиков Т.А., Шарипов Б.К. Технология извлечения золота тиомочевин-

ным выщелачиванием из лежалых отвалов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2020. № 2. С. 4–13. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-4-13>
19. Барченков В. В. Опыт тиокарбамидного выщелачивания золотосодержащего концентрата // Золотодобыча [Электронный ресурс]. URL:

<https://zolotodb.ru/article/12345> (22.08.2020).
20. Радомская В.И., Радомский С.М., Павлова Л.М. Условия применения технологий тиокарбамидного выщелачивания золота и серебра // Георесурсы. 2013. № 5(55). С. 22–27. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.55.5.6>

References

1. Barbosa-Filho O, Monhemius AJ. Thermochemistry of thiocyanate systems for leaching gold and silver ores. In: *Precious Metals – 89: Proceedings of the Intern. Symposium “The Minerals, Metals and Materials Society”*. 27 February – 2 March 1989, Las-Vegas. Warrendale; 1989, p. 307–339.
2. Reuter MA. Gold hydrometallurgy: theory and practice. *Gold Bulletin Great Britain*. 1999;36.
3. Djunushaliev TCh, Borbieva DB. The thiocarbamide gold extraction from the refractory copper-gold ores of the Dolpran (KR). *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni I. Razzakova = KSTU NEWS*. 2015;36:240–243. (In Russ.)
4. Zinchenko ZA, Tyumin IA. Researches of gold extraction from flotation tailings of Djijicrut deposit narrow level by thiourea. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2013;56(10):796–800. (In Russ.)
5. Samikhov ShR, Zinchenko ZA, Bobomurodov OM. Study of the leaching technology conditions gold and silver by thiourea from ores of Chore deposit. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2013;56(4):318–324. (In Russ.)
6. Yujie Guo, Xue Guo, Haiyan Wu. A novel bio-oxidation and two-step thiourea leaching method applied to a refractory gold concentrate. *Hydrometallurgy*. 2017;171(4):213–221. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.05.023>
7. Li Jing-ying, Xu Xiu-li, Liu Wen-quan. Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones. *Waste Management*. 2012;32(6):1209–1212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.026>
8. Manju G, Birendra BA, Hidetaka K, Shafiq A. Recovery of gold and silver from spent mobile phones by means of acidothiourea leaching followed by adsorption using biosorbent prepared from persimmon tannin. *Hydrometallurgy*. 2013;133:84–93. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.12.003>
9. Zhang Hongguang, Ritchie IM, La Brooy S. The adsorption of gold thiourea complex onto activated carbon. *Hydrometallurgy*. 2004;72(3-4):291–301. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00182-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00182-8)
10. Voiloshnikov GI, Voiloshnikova NS, Grigorieva II, Byvaltsev AV. Sorption of gold by activated carbons from noncyanic solvents and desorption of gold from saturated coal. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceeding of Irkutsk State Technical University*. 2010;7:138–143. (In Russ.)
11. Larionov VR, Fedoseev SM. Sorption of gold from thiourea solutions. *Obogashchenie rud*. 2003;6:10–12. (In Russ.)
12. Tarasevich MR. Electrochemistry of carbon materials. Moscow: Nauka; 1984, 253 p. (In Russ.)
13. Ponomarenko EA, Frumkin AN, Burshtein RKh. Chemisorption of oxygen and adsorption of electrolytes on activated charcoal. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1963;149(5):1123–1126. (In Russ.)
14. Elshin VV, Golodkov YuE, Bogidaev SA. Electrochemical studies of the sorption mechanism of gold and silver by active carbons. *Tsvetnye Metally*. 2005;4:32–35. (In Russ.)
15. Elshin VV, Golodkov YuE, Tyurin NG. Electrochemical interactions under the sorption of complex compounds of gold and silver by active carbons. *Tsvetnye Metally*. 1994;3:25–27. (In Russ.)
16. Dudarev VI, Elshin VV, Oznobikhin JIM. Preparation and study of carbon sorbents with a developed porous structure. *Zhurnal Prikladnoi Khimii = Journal of Applied Chemistry*. 1999;72(2):319–321. (In Russ.)
17. Pomazkina OI, Filatova EG, Dudarev VI, Dudareva OV. Sorption of iron (II) ions by carbon sorbents. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceeding of Irkutsk State Technical University*. 2011;2:156–158. (In Russ.)
18. Boboev IR, Selnitsin RS, Kholikov TA, Sharipov BK. Technology of gold extraction from mature tailings by thiourea leaching. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy*. 2020;(2):4–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-4-13>
19. Barchenkov VV. Experience of thiocarbamide leaching of gold-bearing concentrate. *Zolotodobycha*. Available from: <https://zolotodb.ru/article/12345> [Accessed 22nd August 2020]. (In Russ.)
20. Radomskaya VI, Radomskii SM, Pavlova LM. Terms of technologies application of thiourea leaching of gold and silver. *Georesursy*. 2013;5(55):22–27. (In Russ.) <http://doi.org/10.18599/grs.55.5.6>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ёлшин Виктор Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации и управления,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: dean_zvf@istu.edu

Голодков Юрий Эдуардович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации и управления,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: yrg27@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 10.11.2020; одобрена после рецензирования 30.11.2020; принята к публикации 21.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Elshin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Automation and Management,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: dean_zvf@istu.edu

Yuri E. Golodkov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Automation
and Management,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: yrg27@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 10.11.2020; approved after reviewing 30.11.2020; accepted for publication 21.12.2020.



К вопросу ресурсо- и энергосбережения в производстве корунда

© П.С. Паляницин, П.А. Петров, В.Ю. Бажин

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

Резюме: Цель – изучение и определение перспективных направлений и технических решений для повышения ресурсосбережения и энергоэффективности в производстве корунда, на основе проведенного патентного исследования по совершенствованию и оптимизации плавки. Пути оптимизации процесса получения корунда рассматривались по трем направлениям с точки зрения энергосбережения. Первое направление связано с развитием перспективных технических разработок, которые были изучены для выбора рациональных рабочих режимов и определения основных факторов, влияющих на скачки напряжения в течение технологического процесса и выход годной продукции. Рассмотрены условия для снижения удельных энергозатрат и повышение экологичности производства на всех стадиях от изотермического спекания корунда, получения электрокорунда, мелкокристаллического корунда до монокристаллов корунда. Второе направление – оптимизация производства корунда на всех стадиях для разработки оптимального алгоритма управления технологическим процессом, при этом возможно снижение расхода электроэнергии на 10–12% по сравнению с действующими нормативами. Третье направление – разработка технических решений с изменением отдельных конструктивных узлов печных агрегатов, а именно: использование современных комплектующих и новых теплоизоляционных материалов, а также применение отработанных теплоносителей в качестве источников вторичных энергоресурсов, ввод дополнительных контроллеров автоматизированной системы управления процессом. Аналитическое исследование показало, что результатом оптимизации должны являться модернизированные конструкции установок и электрического оборудования, которые могут обеспечить максимальный электрохимический КПД и соответствующую герметичность печей. Разработаны критерии энергоснабжения и качества электроэнергии, позволяющие стабилизировать материальный баланс печи и решить вопросы ресурсосбережения. Данные мероприятия позволяют снизить потерю сырья до 20–25%, удельное энергопотребление в процессе производства корунда на 2–3 тыс. кВт·ч на 1 т.

Ключевые слова: энергосбережение, производство корунда, глинозем, энергопотребление, коэффициент полезного действия, оптимизация технологического процесса

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания по проекту № FSRW-2020-0014 на 2020 год. Тема: «Развитие междисциплинарных направлений комплексного освоения недр земли и сохранения природы». Направление (тематика на 2020 год): Аналитический обзор и разработка концепции комплексной переработки минерального и техногенного сырья с газификацией твердого углеводородного сырья.

Для цитирования: Паляницин П.С., Петров П.А., Бажин В.Ю. К вопросу ресурсо- и энергосбережения в производстве корунда. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1347–1356. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1347-1356>

Issues of resource and energy saving in corundum production

Pavel S. Palyanicin, Pavel A. Petrov, Vladimir Yu. Bazhin

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract: The purpose of this article is study and identification of the most promising trends and engineering solutions in order to improve resource saving and energy efficiency in the production of corundum on the basis of the conducted patent review on melting improvement and optimization. The ways to optimize the corundum production are considered in three directions from the point of view of energy saving. The first direction relates to the development of promising engineering developments. The latter are studied to select rational operating modes and determine the main factors affecting voltage surges during the technological process and useful product yield. Consideration is given to the conditions for reducing specific energy consumption and improvement of production environmental friendliness at all stages beginning from isothermal sintering of corundum, production of electrocorundum, fine corundum to single corundum crystals. The second direction is the optimization of corundum production at all stages for the development of an optimal control algorithm for the technological process. In this case the electricity consumption might be reduced by 10-12% as compared to current standards. The third direction is the development of engineering solutions involving the change of individual struc-

tural units of furnaces, namely, the use of modern components and new heat insulating materials, as well as the application of spent heat carriers as the sources of secondary energy resources and the introduction of additional controllers of the automated control system of the process. The analytical study has shown that the result of optimization should be upgraded designs of plants and electrical equipment, which can provide maximum electrochemical efficiency, and corresponding furnace tightness. Criteria for energy supply and energy quality making possible to stabilize furnace material balance and solve resource saving issues have been developed. These measures allow to reduce the loss of raw materials up to 20-25%, the specific energy consumption under the production of corundum by 2-3 thousand kWh per 1 t.

Keywords: energy saving, corundum production, alumina, energy consumption, efficiency, process optimization

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the State assignment for the project no. FSRW-2020-0014 for 2020. Topic: "Development of interdisciplinary directions of integrated development of subsoil and nature conservation". Direction (theme for 2020): Analytical review and development of the concept of complex processing of mineral and man-made raw materials with gasification of solid hydrocarbon raw materials.

For citation: Palyanitsin PS, Petrov PA, Bazhin VYu. Issues of resource and energy saving in corundum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1347–1356. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1347-1356>

ВВЕДЕНИЕ

Вопросами получения корунда занимаются ученые и производственники по всем мире [1–7].

Основной проблемой в получении искусственных корундов является высокая стоимость сырья (A_2O_3 – оксида алюминия с содержанием 99,9%). Значительные его потери связаны с газопылеуносом (15–20%), переходом в излишние настывы и с фазовыми переходами в различные модификации A_2O_3 при отклонениях технологического режима плавки. Наиболее остро стоят вопросы энергосбережения в производстве белого корунда, когда расход электроэнергии может превышать 18–20 тыс. кВтч на 1 т.

Вопросы энергосбережения во всех сферах не могут игнорироваться на фоне экспоненциального роста потребления энергоресурсов и выпуска готовых продуктов, а также из-за факта ограниченности ресурсов [8–12]. Корунд, с точки зрения использования полезно-применимых свойств, является основой таких материалов как силикатные огнеупоры, твердые режущие материалы, комбинированные блоки для металлургических печей. К основным направлениям энергосберегающих мероприятий в производстве корунда в электротермических печах относят повышение качества электроэнергии в часы ограничений, стабилизацию нагрузки от трансформаторов в заданных пределах, а также снижение затрат энергии на сопутствующие операции и уменьшение удельных затрат энергии на единицу готового материала при сохранении

соблюдения предъявляемых к нему требований [13].

Корунды относят к искусственным материалам, представляющим собой кристаллический α -оксид алюминия (Al_2O_3). Основная особенность данного материала – его твердость, по данному показателю корунд уступает только алмазу (9 – твердость корунда по шкале Мооса). Благодаря этому свойству корунды и получили широкое применение как абразивный материал и теплоизоляторы, а также в ювелирном деле, в изготовлении лазеров, точных механизмов, оптических устройств, в военном деле [14–16].

Основная проблема при производстве искусственного корунда – высокая стоимость сырья для его производства (оксид алюминия чистотой более 99%), которая вызвана сложностью используемого аппаратного оформления многочисленных переделов [17]. Оксид алюминия такой чистоты получают из металлургического глинозема, с чистотой до 99,7% (марка Г-000), который требует дополнительной очистки. Очистка глинозема от примесей химическим способом реализована за рубежом [18, 19]. Именно примеси влияют на технологические режимы металлургических печей и расход электроэнергии, срок службы и производительность [20]. В этой связи представляет научно-технический интерес рассмотрение вопросов, связанных с изменением формы рабочего пространства (ФРП) печи и влиянием количества примесей, в частности, натрия на изменение ФРП до загрузки шихты, во время плавления и по-

сле окончания производственного цикла. Так, в печах по производству корунда АО «РУСАЛ Бокситогорск» при превышении содержания натрия в шихте, особенно при неравномерной амперной нагрузке в ванне, возникают зоны, связанные с ростом настывшей боковой футеровки. В дальнейшем это приводит к изменению теплового баланса печи и потерям сырья.

В России одним из передовых производителей корунда, изделий и материалов из него является Бокситогорский глиноземный завод АО «РУСАЛ Бокситогорск» (Бокситогорск, Ленинградская обл.). Основными трендами компании являются ресурсосбережение и вопросы, связанные со снижением «углеродного следа» (расход дорогостоящих электродов печей). При выплавке белого электрокорунда ввиду легкой подвижности нагретого глинозема происходит вынос части его из электропечи вместе с отходящими газами [20]. Из закрытых сводом электропечей мощностью 5500–6500 кВт унос мелких частиц глинозема в процессе плавки составляет 180–200 кг/ч, причем при плавке предварительно глубоко прокаленного глинозема пылеунос снижается и составляет около 65–70 кг/ч. Для решения подобных задач необходима аналитическая оценка существующих металлургических технологий, связанных с выбросами CO и CO₂, разработка технологий утилизации сажи и углерода с последующей переработкой до товарной продукции (наноматериалы и технический углерод). Применение электрофильтров в специальной противочной камере с осадительными элементами позволяет улавливать до 90% всей массы улетающих из печи частиц глинозема и углерода (сажи).

Следовательно, необходима разработка технических и технологических мероприятий по уменьшению удельного расхода электроэнергии до 15–16 кВт·ч на 1 т корунда при снижении выбросов твердого углерода в виде пыли и газов, которые можно утилизировать. Также стоит рассмотреть возможность газификации углеродной пыли, например, которая содержится в диоксиде углерода, что описано в работе [21].

Для снижения энергозатрат и повышения

эффективности производства корундов в данной работе были определены три направления исследований: модернизация и совершенствование технологического процесса; повышение эффективности процесса за счет качества управления процессом и технологическими параметрами; разработка технических решений по энергосбережению за счет корреляционной связи энергоснабжающих (трансформаторов) и потребляющих установок (рудотермических печей (РТП)), включая основной металлургический агрегат, печь РТП (метод сквозной автоматизации).

РЕШЕНИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КОРУНДА

Одним из эффективных способов совершенствования технологического процесса получения корунда является использование новых технических решений и инновационных технологий, которые ведут к повышению качества продукции и снижению энергоемкости этого процесса [22].

В исследовании [23] рассматривается эксперимент по изотермическому спеканию корунда, подвергнутого механоактивации (МА) в присутствии добавок алюминатной природы. Использовался порошок корунда (ТУ 2-036-00224450-022-09), который состоит из α -Al₂O₃ с величиной удельной поверхности равной 150 м²/кг, алюмоборфосфатное связующее (ТУ 133-08-606-87) со значением плотности 1590 кг/м³. В качестве добавок были выбраны легко разлагающиеся при нагревании боксит Североонежского месторождения, 2Al₂O₃·B₂O₃·5H₂O-борат алюминия, а также нитрат алюминия Al(NO₃)₃. В качестве активатора использовалась планетарная мельница высокой энергонапряженности. В результате интенсивность спекания при 1750⁰С обычного корунда и при 1300⁰С активированного в течение 15–20 мин почти одинаковы, что позволяет уменьшить температуру обжига с сохранением интенсивности спекания. Наиболее эффективная добавка в данном процессе – борат алюминия. В нашем случае для стабилизации теплового и материального баланса печи эта добавка приведет к снижению общей температуры

процесса при сохранении его интенсивности (увеличению силы тока), а также к снижению энергоемкости процесса, и, как следствие, к уменьшению удельных энергозатрат на единицу готового материала. Полученный результат может быть объяснен снижением энергии активации процесса и интенсификации спекания корунда при добавках 2–4% боксита, нитрата алюминия, бората алюминия к порошкообразному корунду с алюмоборфосфатным связующим и следующей МА смеси в течение 5–10 мин.

Анализ показал, что предварительная механоактивация глинозема повышает удельную поверхность частиц, увеличивая скорость их растворения в расплаве, а также объем и состав добавок оказывают влияние на энергию активации при спекании корунда, от которой зависит энергоемкость процесса в целом. В этой связи подтверждается актуальность изучения влияния различных добавок в процессе производства корунда на температурный режим процесса и другие показатели. Особенно это касается вопроса текущего изменения ФРП.

В патенте [24] описывается способ получения электрокорунда дешевле и с более высокой термостойкостью, по сравнению с белым электрокорундом, а также с низкой температурой спекания при постоянном объеме, по сравнению с нормальным электрокорундом для огнеупорных материалов. Новый тип электрокорунда имеет более высокий уровень физико-химических свойств, который лучше, чем у прототипов. При этом по данной технологии удастся также снизить удельный расход электроэнергии на 1 т получаемого электрокорунда от 2766 кВт·ч до 1555 кВт·ч. Особенностью данного способа получения электрокорунда является то, что в процессе плавки производят ввод дополнительного глинозема (40–60 масс. %) и предварительно термообработанного боксита, состоящего из Al_2O_3 (82–93%), SiO_2 (3–10%), TiO_2 (2–5%), Fe_2O_3 (1,5–2%), $\Sigma CaO+MgO$ (0,2–0,3%) и прочих примесей, а плавление шихты происходит в окислительно-восстановительной среде.

Описанный патент также подтверждает эффективность добавок в процессе произ-

водства корунда для формирования правильной ФРП.

В техническом решении [25] описан способ для получения мелкокристаллического корунда. Особенность данного метода состоит в том, что отходы электротехнической проволоки, которые состоят не менее чем на 99,5% из алюминия, подвергаются электроэрозионному диспергированию в дистиллированной воде, напряжение на электродах составляет 90 В, частота импульсов 50 Гц, емкость разрядных конденсаторов 65 мкФ. Данный процесс был ранее апробирован в лабораториях кафедры металлургии Горного университета. Это позволяет получать корунд с низкой себестоимостью, который в особенности характеризуется отсутствием газовых выделений и более низкими затратами энергии, то есть в процессе интенсивного взаимодействия с водой происходит выделение водорода с образованием мелкодисперсного оксида алюминия с переходом в корунд высшего сорта при последующем нагреве. Средний показатель затрат электроэнергии при данном способе составляет 2,1 кВт·ч/т. Данный показатель ниже, чем у других способов получения корунда. Данное решение интересно тем, что процесс происходит в несколько этапов: подготовка к электроэрозионному диспергированию, сортировка алюминиевых отходов, их промывка, сушка, обезжиривание. Контролируется частота следования импульсов, емкость конденсаторов, напряжение на электродах. При реализации данного способа, в нашем случае, при плавке на белый корунд через изменения значений технологических параметров можно контролировать текущий уровень электропотребления. Важно, что при диспергировании к электродам прикладывается импульсное напряжение генератора, а далее – к алюминиевым отходам (алюминиевые отходы служат в качестве электродов также). Если происходит электрический пробой рабочей среды, находящейся в межэлектродном пространстве при достижении определенного напряжения, то образуется канал разряда. Материал в этой точке разряда плавится и испаряется из-за высокой концентрации тепловой энергии, изменяется рабочая среда,

которая окружена газообразными продуктами распада в канале разряда. В результате появляющихся в газовом пузыре и канале разряда значительных динамических сил, капли расплавленного материала выбрасываются в рабочую среду за границы зоны разряда, затем капли застывают в рабочей среде, образуют частицы порошка оксида алюминия. На третьем этапе проводится выгрузка рабочей жидкости с порошком из реактора. При этом достигается следующий технический результат: получен оксид алюминия (корунд) в виде частиц правильной сферической формы, из которого плавлением получают корунд высшего качества без примесей. Этот способ позволяет получать корунд без использования химических реагентов, что значительно снижает себестоимость, а также позволяет исключить загрязнение химическими веществами сам расплав и окружающую среду. Такой подход подтверждает актуальность вопроса, связанного качеством электроэнергии и стабилизацией электрических параметров в заданных пределах в зависимости от теплового баланса самого технологического процесса.

Техническое решение [26] содержит описание промышленного способа получения оксида алюминия, пригодного для получения монокристаллов корунда, а также повышение удельной производительности и электрохимического выхода при снижении трудоемкости.

Данный электрохимический способ включает анодное растворение алюминия в водном растворе хлористого натрия, отделение гидроксида алюминия и прокаливание. Особенность данного способа: концентрация раствора хлорида натрия составляет 30–300 г/дм³, анодное растворение алюминия осуществляется с помощью выпрямленного тока по двухполупериодной схеме с плотностью тока от 0,015 А/см² до 0,045 А/см²; температура, при которой происходит прокаливание гидроксида алюминия, составляет от 600⁰С до 1350⁰С. Также данный метод отличается тем, что осадок гидроксида алюминия подвергается отмыванию, фильтрации и подаче на прокаливание. Удельная производительность данного метода составляет от 228 г/кВт·ч до 349 г/кВт·ч, данный показатель у

прототипа находится в пределах от 75 г/кВт·ч до 83 г/кВт·ч. Электролит – водный раствор хлорида натрия заливают в электролизер, концентрация раствора находится в указанном интервале, алюминиевые электроды помещают туда же. Выпрямленный ток по двухполупериодной схеме пропускают через ячейку, сила тока постоянна – соответствующая плотности тока 0,015 А/см². Уровень электролита поддерживается постоянным в процессе электролиза. Полученный по окончании осадок гидроксида алюминия подвергается отмывке, фильтрации и прокаливанию в течение 2 ч при 600⁰С.

Способ получения пластинчатого корунда, описанный в работе [27], включает формирование брикета из тонкоизмельченного оксида алюминия или гидроксида алюминия, высокотемпературный обжиг и дробление брикета производят перед обжигом, который проводят при температуре 1990⁰С в печи лучистого нагрева в течение 10–30 мин. Данный способ сравнивается с двумя известными способами получения пластинчатого корунда. Первый: получение пластинчатого корунда, который включает формирование брикета из тонкоизмельченных материалов, его обжиг в печах периодического действия или туннельных печах с выдержкой 20 ч при температуре 1750⁰С. Второй: включает прессование тонкоизмельченных порошкообразных оксидов или гидроксидов алюминия в брикеты и высокотемпературный обжиг при температуре 1650⁰С в шахтных или вращающихся печах с выдержкой от 0,5 ч до 1 ч. Недостатками данных способов являются низкая чистота получаемого корунда, длительность выдержки. Получаемый эффект заключается в снижении энергоемкости технологического процесса в целом за счет снижения продолжительности обжига. Увеличение размеров получаемых кристаллов при сохранности чистоты кристаллов достигается за счет исключения тепловых потерь футеровки печи и при дроблении высокопрочного брикета. Важным является, то подобные способы получения корунда подтверждают важность оптимального температурного режима печи, который влияет на продолжительность и энергоемкость технологического процесса.

Проведенные патентный обзор и анализ новых решений в электрохимических процессах, связанных с использованием алюминий-содержащей шихты, указывают на актуальность и реальную возможность разработки новой энергосберегающей технологии выплавки корунда. Предположительно, что регулирование энергетических параметров РТП при продувке углекислым газом позволит получать продукт с меньшим содержанием примесей.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕШЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В работе [28] автором был составлен алгоритм оптимального управления технологическим процессом производства электрокорунда на основе его динамической модели, были проведены вычислительные испытания алгоритма. С целью подтверждения эффективности алгоритма был осуществлен ряд опытных плавов на действующей печи № 1 РКО–10,5 цеха № 2 ОАО «Запорожский абразивный комбинат».

Описанный в работе [28] алгоритм управления технологическим процессом производства нормального электрокорунда в составе системы «Энергия СУ01» перешел в опытно-промышленную эксплуатацию комбината. В дальнейшем планируется принять и дополнить существующую систему управления тем, что каждое управляющее звено должно быть оптимизировано, а также необходимо производить оптимальные управляющие воздействия на каждый управляющий параметр в целях обеспечения качества управления процессом и технологическими параметрами.

Полученные результаты, которые были подтверждены практикой на действующем предприятии, свидетельствуют о необходимости оптимизации управления технологическим процессом производства корундов в целях повышения эффективности процесса.

Получение корунда связано с использованием высоких температур, применением электрической и других видов энергии. В любой реальной технологической установке будут иметь место необратимые потери энергии – следствие несовершенства процесса

[29]. Конструкции установок должны обеспечивать максимально полное использование подводимой энергии, а также минимально возможные потери в окружающую среду. Меры энергосбережения подразумевают использование любого отработанного тепла технологической установки в качестве вторичных энергоресурсов [30]. Для обеспечения энергоэффективного протекания процесса установки должны быть оснащены системами, обеспечивающими автоматизированное управление процессом [31–34].

Анализ существующих технических решений показал, что к энергосберегающим технологиям в процессе производства корунда можно отнести следующие:

- применение новых теплоизоляционных материалов и сохранение герметичности печей, данные меры позволят снизить потери тепла в окружающую среду, соответственно, снизить энергоемкость реального процесса;

- использование тепла установки, тепла охлаждающих теплоносителей и тепла готового материала в качестве вторичных тепловых энергоресурсов, а также использование переработанных углеродистых отходов в качестве вторичных горючих энергоресурсов, в частности, как этап газификации;

- использование систем автоматизированного управления технологического процесса;

- оптимальная конструкция установок и электрического оборудования, обеспечивающая максимальный электрохимический КПД.

Использование современных комплектующих, новых конструкторских решений и теплоизоляционных материалов, применение автоматизированных систем управления технологическими процессами обеспечивают повышение качества и воспроизводимости процессов роста кристаллов, также данные меры ведут к снижению до 25% удельного энергопотребления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены вопросы, касающиеся энергосбережения в процессе получения корунда. В данной сфере были выделены и освещены три направления.

1. Модернизация непосредственно самих технологий получения корунда – повышение эффективности процесса на величину от 10% до кратного увеличения выхода продукции при тех же энергозатратах. Данный факт говорит о необходимости постоянного поиска, совершенствования и внедрения новых инновационных способов и технологий производства, которые будут иметь преимущества перед уже используемыми.

2. Оптимизация управления технологическим процессом получения корунда. За счет реализации оптимального алгоритма управления данным процессом может быть получено сокращение расхода электроэнергии до 10%.

3. Энергосберегающие решения конструкций установок, включающие комплексные и широкие решения, такие как использование отработанных в качестве вторичных энергоресурсов теплоносителей, применение сквозной системы автоматизации, оптималь-

ных конструкций энергоустановок при использовании теплоизоляционных материалов нового типа для сохранения герметичности, позволят снизить общую энергоемкость процесса до 25%.

Данный факт говорит о необходимой качественной проектной и конструкторской работе над разработкой установок и следующей за ними работе по их производству.

Очевиден следующий факт: для получения максимального эффекта меры энергосбережения должны применяться комплексно, которые приведут к снижению энергоемкости производства, повышению выхода продукта, в сочетании с уменьшением расхода глинозема, энергоресурсов, а в отдельных случаях – к повышению экологичности процесса. Для такого материала как корунд, который имеет широкое применение и высокую стоимость, снижение энергоемкости производства имеет высокое значение для промышленности и экономики в целом.

Список литературы

1. Niżankowski C. Manufacturing sintered corundum abrasives // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2002. Vol. 2. P. 53–64. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6090-2>
2. Zeidler S., Posch Th., Mutschke H. Mid-infrared properties of corundum, spinel, and α -quartz, potential carriers of the 13 μm feature // Astronomy and Astrophysics. 2013. Vol. 553. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220459>
3. Богданов С.П., Гаршин А.П., Сычев М.М. Бронекерамика на основе порошков корунда "ядро-оболочка" // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. XI Междунар. симпозиума: в 2 ч. (г. Минск, 10–12 апреля 2019 г.). Минск: ИД «Белорусская наука», 2019. Ч. 1. С. 424–430.
4. Nadolny K. State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 74. P. 1445–1457. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6090-2>
5. Данчевская М.Н., Ивакин Ю.Д., Багдасаров Х.С., Антонов Е.В., Костомаров Д.В., Панасюк Г.П. Синтетический мелкокристаллический корунд – новое сырье для выращивания лейкосапфира // Перспективные материалы. 2009. № 4. С. 28–33.
6. Li Zi-cheng, Li Zhi-hong, Zhang Ai-ju, Zhu Yu-mei. Influence of thermal treatment conditions on two-dimensional crystal growth of nanocrystal corundum abrasives // Materials Research Bulletin. 2009. Vol. 44. Issue 4. P. 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2008.09.026>
7. McCormick M. Asia-Pacific leading world's corundum production [Электронный ресурс]. URL: <https://www.indmin.com/Article/3499879/Regulation-LatestNews/Asia-Pacific-leading-worlds-corundum-production.html> (07.08.2020).
8. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Alborov A.D. Research and mathematical modeling of the thermal and power performance of resistance furnaces at metallurgical enterprises // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020. Vol. 641. P. 630–636. http://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3_69
9. Жуковский Ю.Л., Сизякова Е.В. Внедрение системы энергосбережения и энергоэффективности на предприятиях металлургического комплекса // Записки горного института. 2013. № 202. С. 155–160.
10. Пингин В.В., Третьяков Я.А., Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В. Перспективы модернизации ошиновки электролизера С-8БМ (С-8Б) // Цветные металлы. 2016. № 3. С. 35–41. <http://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>
11. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondrat'ev V.V., Mazurenko V.V., Shcheglov E.L. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases // Metallurgist. 2017. Vol. 60. No. 9-10. P. 973–977. <http://doi.org/10.1007/s11015-017-0394-z>
12. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии. Екатеринбург: ОАО «УИПЦ», 2012. 670 с.
13. Косенко Н.Ф., Филатова Н.В., Грехнев А.Ю. Кине-

тика активированного изотермического спекания корунда // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2006. Т. 49. № 4. С. 56–58.

14. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – a short guide for civil engineer // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. P. 53–62. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>

15. Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 94. P. 186–192. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.090>

16. Педро А.А. Роль химического взаимодействия электрода с расплавом в изменении гармонического состава тока в электродах // Электротехника. 1997. № 4. С. 27–30.

17. Лысенко А.П., Серёдкин Ю.Г., Зенькович Г.С. Электролитический способ получения Al_2O_3 чистотой 99,99–99,999% // Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы: сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 13–15 мая 2009 г.). М.: Изд-во МИСиС, 2009. С. 322–323.

18. Лысенко А.П., Серёдкин Ю.Г., Зенькович Г.С. Механизм электролитического получения оксида алюминия, пригодного для производства монокристаллов корунда // Технология металлов. 2009. № 12. С. 8–12.

19. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. Carbide formation at a carbon-graphite lining cathode surface wettable with aluminum // Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 57. No. 3. P. 292–296. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9971-0>

20. Корнеев С.В., Трусова И.А. Управление шлаковым режимом в электродуговых печах // Литье и металлургия. 2017. № 4. С. 48–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-4-48-52>

21. Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П. Газификация пористых частиц углерода в диоксиде углерода // Химическая физика. 2010. № 12. С. 18–23.

22. Ватулин И.И., Минков О.Б., Сухарев А.В., Сухарев В.А., Шингарев Э.Н. Высокотемпературное алюминиотермическое восстановление оксида кальция // Материаловедение. 2009. № 3. С. 46–50.

23. Косенко Н.Ф., Филатова Н.В., Шиганов А.А. Кинетика активированного изотермического спекания корунда в присутствии алюминатных добавок // Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 2. С. 193–196.

24. Пат. № 2347766С2, Российская Федерация, С04В 35/107. Электрокорунд и способ его получения / В.А. Перепелицын, А.С. Зубов, И.В. Кормина, Л.А. Карпец, Е.М. Гришпун, А.М. Гороховский. Заявитель и патентообладатель ОАО "Первоуральский динасовый завод" (ОАО "ДИНУР"). Заявл. 16.04.2007; опубл. 27.02.2009.

25. Пат. № 2664149С2, Российская Федерация, С01F

7/42. Способ получения мелкокристаллического корунда / Е.П. Новиков, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ) (RU). Заявл. 21.03.2016; опубл. 15.08.2018.

26. Пат. № 2366608С1, Российская Федерация, С01F 7/42. Способ получения оксида алюминия, пригодного для производства монокристаллов корунда / А.П. Лысенко, В.А. Бекишев, Ю.Г. Серёдкин, Г.С. Зенькович. Заявители и патентообладатели: Лысенко Андрей Павлович (RU), Бекишев Владимир Афанасьевич (RU), Серёдкин Юрий Георгиевич (RU). Заявл. 08.05.2008; опубл. 10.09.2008.

27. Пат. № 1 104 798 А1, СССР, С01F 7/02. Способ получения пластинчатого корунда / Д.С. Рутман, Н.М. Пермикина, С.А. Азимов, Г.Т. Адылов, А.Г. Белогрудов. Заявитель и патентообладатель Восточный научно-исследовательский и проектный институт огнеупорной промышленности, Физико-технический институт АН УССР. Заявл. 08.04.1983; опубл. 23.08.1991.

28. Качан Ю.Г., Мных А.С. Алгоритм динамической оптимизации процесса производства электрокорунда нормального на базе метода терминального управления // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2008. № 32. С. 48–56.

29. Педро А.А., Суслов А.П. Вентильный эффект в электродной печи // Цветные металлы. 2012. № 12. С. 37–41.

30. Peretyatko M.A., Yakovlev P.V., Peretyatko S.A., Deev A.S., Dyachenok G.V. The study of heat transfer during boiling process of organic fluid // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1614. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012069>

31. Shurygin Y.A. Technologies of organizational energy saving at metallurgical enterprises // International Russian Automation Conference (Sochi, 9–16 September 2018). Sochi: IEEE, 2018. <http://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501605>

32. Дубовиков О.А., Яскеляйнен Э.Э. Переработка низкокачественного бокситового сырья способом термохимия-Байер // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 668–674. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.668>

33. Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Кондратьев В.В., Ершов В.А., Карлина А.И. Обоснование возможности нагрева глинозема теплом анодных газов алюминиевого электролизера // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 3. С. 131–138.

34. Белоглазов И.И., Суслов А.П., Педро А.А. Изменение постоянной составляющей фазного напряжения при плавке циркониевого электрокорунда // Цветные металлы. 2014. № 5. Р. 86–89.

References

1. Niżankowski C. Manufacturing sintered corundum abrasives. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2002;2:53–64. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6090-2>

2. Zeidler S, Posch Th, Mutschke H. Mid-infrared properties of corundum, spinel, and α -quartz, potential carriers of the 13 μm feature. *Astronomy and Astrophysics*. 2013;553.



<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220459>

3. Bogdanov SP, Garshin AP, Sychev MM. Armor ceramics based on corundum core-shell powders. In: *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka: sbornik dokladov XI Mezhdunarodnogo simpoziuma = Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding: collected reports of XI International symposium: 10–12 April 2019, Minsk. Minsk: Belorusskaya nauka; 2019, part. 1, p. 424–430.*
4. Nadolny K. State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2014;74:1445–1457. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6090-2>
5. Danchevskaya MN, Ivakin YuD, Bagdasarov ChS, Antonov EV, Kostomarov DV, Panasyuk GP. Synthetic fine-crystalline corundum – new raw material for leucosapphire single crystals growth. *Perspektivnye materialy.* 2009;4:28–33. (In Russ.)
6. Li Zi-cheng, Li Zhi-hong, Zhang Ai-ju, Zhu Yu-mei. Influence of thermal treatment conditions on two-dimensional crystal growth of nanocrystal corundum abrasives. *Materials Research Bulletin.* 2009;44(4):762–767. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2008.09.026>
7. McCormick M. Asia-Pacific leading world's corundum production. Available from: <https://www.indmin.com/Article/3499879/Regulation-LatestNews/Asia-Pacific-leading-worlds-corundum-production.html> [Accessed 07th August 2020].
8. Klyuev RV, Bosikov II, Alborov AD. Research and mathematical modeling of the thermal and power performance of resistance furnaces at metallurgical enterprises. *Lecture Notes in Electrical Engineering.* 2020;641:630–636. http://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3_69
9. Zhukovskiy YL, Sizyakova EV. The introduction of the system of energy saving and energy efficiency at the enterprises of metallurgy. *Zapiski Gornogo Instituta.* 2013;202:155–160. (In Russ.)
10. Pingin VV, Tretyakov YaA, Radionov EYu, Nemchinova NV. Modernization prospects for the bus arrangement of electrolyzer S-8BM (S-8B). *Tsvetnye metally.* 2016;3:35–41. (In Russ.) <http://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>
11. Shakhrai SG, Nemchinova NV, Kondrat'ev VV, Mazurenko VV, Shcheglov EL. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases. *Metallurgist.* 2017;60(9-10):973–977. <http://doi.org/10.1007/s11015-017-0394-z>
12. Yaroshenko YuG, Gordon YaM, Khodorovskaya IYu. *Energy-efficient and resource-saving technologies of ferrous metallurgy.* Ekaterinburg: UIPTs; 2012, 670 p. (In Russ.)
13. Kosenko NF, Filatova NV, Grekhnev AYu. Kinetics of activated isothermal sintering of corundum. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Seriya: Himiya i himicheskaya tekhnologiya = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. Series: Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya.* 2006;49(4):56–58. (In Russ.)
14. Rashad AM. Vermiculite as a construction material – a short guide for civil engineer. *Construction and Building Materials.* 2016;125:53–62. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>
15. Kariya J, Ryu J, Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide. *Applied Thermal Engineering.* 2016;94:186–192. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.090>
16. Pedro AA. Role of electrode chemical interaction with the melt in changing harmonic composition of current in electrodes. *Elektrotehnika = Electrical Engineering.* 1997;4:27–30. (In Russ.)
17. Lysenko AP, Seryodkin YuG, Zen'kovich GS. Electrolytic production method of Al₂O₃ with the purity of 99.99–99.999%. *Metallurgiya cvetnykh metallov. Problemy i perspektivy: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Metallurgy of Non-Ferrous Metals. Problems and Prospects: collected abstracts of the reports of the International scientific and practical conference.* 13–15 May 2009, Moscow. Moscow: MISIS; 2009, p. 322–323. (In Russ.)
18. Lysenko AP, Seryodkin YuG, Zen'kovich GS. Mechanism of electrolytic obtaining of aluminum oxide suitable for the production of corundum single crystals. *Tekhnologiya metallov = Technology of Metals.* 2009;12:8–12. (In Russ.)
19. Gorlanov ES, Bazhin VYu, Fedorov SN. Carbide formation at a carbon-graphite lining cathode surface wettable with aluminum. *Refractories and Industrial Ceramics.* 2016;57(3):292–296. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9971-0>
20. Korneev SV, Trusova IA. Management of the slag adjustment in arc furnaces. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy.* 2017;(4):48–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2017-4-48-52>
21. Gremyachkin VM, Mazanchenko EP. Gasification of porous carbon particles in carbon dioxide. *Himicheskaya fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics.* 2010;12:18–23. (In Russ.)
22. Vatulin II, Minkov OB, Suharev AV, Suharev VA, Shingarev EN. High-temperature aluminothermic reduction of calcium oxide. *Materialovedenie.* 2009;3:46–50. (In Russ.)
23. Kosenko NF, Filatova NV, Shiganov AA. Effect of aluminate additions on the isothermal sintering kinetics of mechanically activated corundum. *Neorganicheskie materialy.* 2007;43(2):193–196. (In Russ.)
24. Perepelitsyn VA, Zubov AS, Kormina IV, Karpets LA, Grishpun EM, Gorokhovskiy AM. *Electrocorundum and its production method.* Patent RF, no. 2347766C2; 2009. (In Russ.)
25. Novikov EP, Ageev EV, Ageeva EV, Altukhov AYu. *Production method of fine-crystalline corundum.* Patent RF, no. 2664149C2; 2018. (In Russ.)
26. Lysenko AP, Bekishev VA, Seryodkin YuG, Zenkovich GS. *Obtaining method of the aluminum oxide suitable for the production of corundum single crystals.* Patent RF, no. 2366608C1; 2008. (In Russ.)
27. Rutman DS, Permikina NM, Azimov SA, Adylov GT, Belogrudov AG. *Production method of lamellar corundum.* Patent RF, no. 1 104 798 A1; 1991. (In Russ.)

28. Kachan YuG, Mnykh AS. Algorithm for dynamic optimization of normal electrocorundum production based on terminal control method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2008;32:48–56.

29. Pedro AA, Suslov AP. Valve action in the electrode furnace. *Tsvetnyye metally*. 2012;12:37–41. (In Russ.)

30. Peretyatko MA, Yakovlev PV, Peretyatko SA, Deev AS, Dyachenok GV. The study of heat transfer during boiling process of organic fluid. In: *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1614.

<http://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012069>

31. Shurygin YA. Technologies of organizational energy saving at metallurgical enterprises. In: *International Russian Automation Conference*. 9–16 September 2018, Sochi. Sochi: IEEE; 2018.

<http://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501605>

32. Dubovikov OA, Yaskelyainen EE. Processing of low-quality bauxite feedstock by thermochemistry-Bayer method. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;221:668–674. (In Russ.)

<https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.668>

33. Shakhrai SG, Skuratov AP, Kondratiev VV, Ershov VA, Karlina AI. Justification of the possibility of heating alumina by aluminum electrolyzer anode gases warmth. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;3:131–138. (In Russ.)

34. Beloglazov II, Suslov AP, Pedro AA. Change of constant component of phase voltage during melting of zirconium corundum. *Tsvetnyye Metally*. 2014;5:86–89. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Паляницин Павел Сергеевич,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21 линия, 2, Россия;

✉ e-mail: ppalyanitsin@yandex.ru

Петров Павел Андреевич,

кандидат технических наук,
декан факультета переработки минерального сырья,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;

e-mail: petrov_pa3@pers.spmi.ru

Бажин Владимир Юрьевич,

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;

e-mail: bazhin-alfoil@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 07.10.20; одобрена после рецензирования 25.11.2020; принята к публикации 18.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel S. Palyanitsin,

Postgraduate Student,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;

✉ e-mail: ppalyanitsin@yandex.ru

Pavel A. Petrov,

Cand. Sci. (Eng.),
Dean of the Faculty of Mineral Raw Material Processing,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;

e-mail: petrov_pa3@pers.spmi.ru

Vladimir Yu. Bazhin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Automation of Technological
Processes and Production,
Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia;

e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 07.10.20; approved after reviewing 25.11.2020; accepted for publication 18.12.2020.

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: pqp@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: pqp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 6 (155) 2020

12+

Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный секретарь Г.П. Привалова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.12.2020 г. Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 24.
Тираж 500 экз. Заказ 219. Поз. плана 3н.

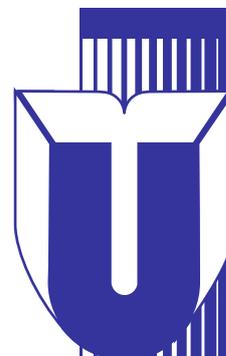
Издание распространяется **бесплатно**

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

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

