

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

iPolytech Journal

Tom **25**, № **5**. 2021/ Vol **25**, № **5**. 2021



<https://vestirgtu.elpub.ru>

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

iPolytech Journal

Tom 25, № 5. 2021/Vol 25, № 5. 2021



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

iPolytech Journal

Том 25, № 5. 2021 / Vol 25, № 5. 2021



Издательство Иркутского
национального исследовательского
технического университета

Publishers of Irkutsk National
Research Technical
University

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

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

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

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

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

Subscription index in the catalog
of JSC "Economic Newspaper"
Publishing House
"The united catalog.
Russian press.
Newspapers and journals"-
41476 (OK + EC)
Address of JSC
"Economic Newspaper":
Ekonomicheskaya Gazeta
CJSC Publishing House 16,
Chernyakhovsky St., block 1,
room 17, Moscow 125319.
Phone: (499) 152-86-11

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

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



Редакционная коллегия

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

КОРНЯКОВ М.В., д.т.н., ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, председатель редакционной коллегии (г. Иркутск, Россия)

ЗАЙДЕС С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение и машиноведение» (г. Иркутск, Россия)

НЕМЧИНОВА Н.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Металлургия и материаловедение» (г. Иркутск, Россия)

СУСЛОВ К.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Энергетика» (г. Иркутск, Россия)

БАЖИН В.Ю., д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю., д.т.н., профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия)

БОЛДЫРЕВА И., д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия)

БОРОВИКОВ Ю.С., д.т.н., и.о. ректора Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)

ВОРОПАЙ Н.И., член-корреспондент РАН, научный руководитель Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

ГАВЛИК ЮЗЕФ, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (г. Краков, Польша)

ЗАКАРЮКИН В.П., д.т.н., профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)

КАРПЕНКО Е.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой лаборатории плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)

КЛЕРА М., д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

КОЛОСОК И.Н., д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

КРЮКОВ А.В., д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)

КУРАБАЦКИЙ В.Г., д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

МАМБАЧЕНКОВ С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

МАТЛИН М.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, Россия)

МЫМРИН В.А., д.г.-м.н., профессор, Федеральный университет штата Парана (Куритиба, Бразилия)

НОВИЦКИЙ Н.Н., д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

ОГАР П.М., д.т.н., профессор Братского государственного университета (г. Братск, Россия)

ПАЗДЕРИН А.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

ПАНТЕЛЕЕВ В.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)

СЕНДЕРОВ С.М., д.т.н., заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

СТЕННИКОВ В.А., д.т.н., профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

СТЫЧИНСКИ З.А., профессор Университета Отто-фон-Герике (г. Магдебург, Германия)

ТЮРИНА Э.А., д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

ФАНГ ЛЮ, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай)

ФЕДЯЕВ А.А., д.т.н., заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Братского государственного университета (г. Братск, Россия)

ХЕЙФЕЦ М.Л., д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)

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

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

Editorial board

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



Содержание	532
------------	-----

Колонка редактора	536
-------------------	-----

Машиностроение и машиноведение

Вулых Н. В., Вулых А. Н. Численный расчет напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в условиях стесненного нагружения.....	538
Пятых А. С., Шапарев П. П. Исследование влияния зажимного патрона на устойчивость процесса фрезерования.....	549
Татанов П. В., Янюшкин А. Р., Шнайдер Д. А., Янюшкин А. С. Влияние орбитального движения электрода на точность электроэрозионной обработки.....	559

Энергетика

Булатов Ю. Н. Групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты для установок распределенной генерации.....	568
Гвоздяков Д. В., Зенков А. В., Губин В. Е., Калтаев А. Ж., Марышева Я. В. Экспериментальные исследования влияния давления воздуха на характеристики распыления водоугольных суспензий.....	586
Тремасов В. А., Григорьева О. А., Кенден К. В. Многокритериальный подход к выбору площадок для размещения солнечно-дизельных систем генерации.....	601

Металлургия и материаловедение

Бажин В. Ю., Горленков Д. В., Нгуен Хю Хоанг, Никитина Л. Н. Реализация опыта цифровых автоматизированных систем управления электролитического рафинирования меди на предприятиях Вьетнама.....	611
Нозягдам Л., Нозягдам С., Сидоров Д. Н. Численная валидация метода разложения Адомиана для решения нелинейного уравнения мелкой воды.....	623
Сизяков В. М., Козырев Б. А. Переработка формиатных растворов после выщелачивания красного шлама.....	633
Топоркова Ю. И., Блудова Д. И., Мамяченков С. В., Анисимова О. С. Обзор методов переработки пылей электродуговой плавки.....	643

Персоналии

Профессор Анатолий Иванович Орлов: ученый-металлург, педагог, организатор высшей школы....	681
--	-----

Content	533
Editor`s column	537
Mechanical engineering and machine science	
Vulykh N. V., Vulykh A. N. Stress-strain numerical simulation for a microprofile subjected to orthogonal impact under constrained loading conditions.....	538
Pyatykh A. S., Shaparev P. P. Investigating the impact of chucks on the stability of a milling process.....	549
Tatanov P. V., Yanyushkin A. R., Schneider D. A., Yanyushkin A. S. Impact of orbiting electrode motion on the accuracy of electrical discharge machining.....	559
Power engineering	
Bulatov Yu. N. Joint voltage and frequency predictive controllers for distributed generation plants.....	568
Gvozdyakov D. V., Zenkov A. V., Gubin V. E., Kaltaev A. Zh., Marysheva Ya. V. Experimental studies into the effect of air pressure on the atomization characteristics of coal-water slurries.....	586
Tremyasov V. A., Grigorieva O. A., Kenden K. V. Multi-criteria approach to selecting sites for solar-diesel hybrid systems.....	601
Metallurgy and materials science	
Bazhin V. Yu., Gorlenkov D. V., Nguyen Huu Hoang, Nikitina L. N. Implementation of digital automated control systems at electrolytic copper refining plants in Vietnam.....	611
Noeiaghdam L., Noeiaghdam S., Sidorov D. N. Dynamical control on the Adomian decomposition method for solving shallow water wave equation.....	623
Sizyakov V. M., Kozyrev B. A. Processing of formate solutions obtained from red mud leaching.....	633
Toporkova Yu. I., Bludova D. I., Mamyachenkov S. V., Anisimova O. S. Review of electric arc melting dust processing methods.....	643
Personalities	
Professor Orlov Anatoliy Ivanovich: metallurgist scientist, teacher, higher school organizer.....	681



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию очередной выпуск научного журнала «iPolytech Journal».

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

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному
творческому сотрудничеству по
научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия

Dear Readers!

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

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

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

The journal "iPolytech Journal" is abstracted and reviewed.

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

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

Editorial Board

Дорогие коллеги!



В 2022 году журнал «Вестник Иркутского государственного технического университета» отметит 25-летие! За это время издание прошло большой путь, знакомя российскую и зарубежную аудитории с результатами интересных исследований в технических науках, проводившихся как в Восточной Сибири, так и по всей России. «Вестник ИрГТУ» дал жизнь ряду замечательных журналов, выходящих в ИРНТУ: некогда существовавшие в журнале рубрики вошли в основу новых изданий. Наконец, настало время для кардинальных перемен в политике журнала. Наша цель – расширение аудитории авторов и читателей из зарубежных стран, продвижение журнала в международные базы данных. Все это, несомненно, будет способствовать продвижению научных достижений в международное пространство. Тем самым научные успехи наших авторов станут доступны ученым во всем мире.

Мне очень приятно анонсировать выпуск нашего «Вестника» в новом формате и под принципиально новым названием – «iPolytech Journal», ориентированном на глобальную академическую англоязычную аудиторию. Первое время планируем публикацию статей в смешенном формате – как на русском, так и на английском языках, постепенно полностью переходя на англоязычную платформу.

В этом выпуске традиционно представлены статьи по 3 разделам: «Машиностроение и машиноведение», «Энергетика» и «Металлургия и материаловедение». При этом связующим звеном разделов являются математическое моделирование и информационные технологии. Действительно, цифровизация промышленности и экономики – это новая реальность, которая найдет отражение и в тематике статей обновленного журнала Иркутского политеха.

От всей души хочу поздравить и поблагодарить замечательную команду журнала «iPolytech Journal» за слаженную работу по запуску новой версии журнала.

***Главный редактор «iPolytech Journal»,
д-р физ.-мат. наук, профессор РАН
Сидоров Денис Николаевич***

Dear Colleagues,

In 2022 the journal Proceedings of Irkutsk State Technical University celebrates its 25th anniversary. A long way has been passed getting Russian and foreign audiences acquainted with the results of challenging research in the field of engineering carried out by the scientists in Eastern Siberia and throughout Russia. It was Proceedings of Irkutsk State Technical University that gave birth to a number of remarkable journals published by Irkutsk National Research Technical University: once being columns in the journal, they formed the basis of new scientific magazines. Today the time has come for radical changes in the journal's policy. Our goal is to expand the audience of authors and readers in foreign countries as well as to have the journal included to international databases. All these will most certainly promote scientific achievements of our authors into the international space and make them available to the scientists all over the world.



I am overjoyed to announce a new issue of Proceedings of Irkutsk State Technical University in an absolutely new format and a conceptually new title – iPolytech Journal that is targeted at a global academic English-speaking audience. At first, we are planning to publish articles in a mixed format – both in Russian and in English gradually switching to the English-language platform.

This issue traditionally presents articles in 3 sections: Mechanical Engineering and Machine Science, Power Engineering, and Metallurgy and Materials Science, whereas mathematical simulation and information technologies serve as a link connecting the sections. It is true that digitalization of industry and economy is a new reality and it will find its reflection in the topics of the articles of the updated journal of Irkutsk Polytechnic Institute.

With all my heart I would like to congratulate and thank a wonderful team of iPolytech Journal who did a great job and launched the new version of the journal.

***Denis Sidorov, The Editor-in-Chief of iPolytech Journal,
Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Professor
of the Russian Academy of Sciences***



Научная статья

УДК 621.77.014

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548>

Численный расчет напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в условиях стесненного нагружения

Николай Валерьевич Вулых^{1✉}, Александр Николаевич Вулых²¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия² Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, Иркутский район, Россия¹ vulix2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2607-4302>² alex43zet@mail.ru

Аннотация. Цель – установить геометрию формоизменения модели микронеровностей на рабочих поверхностях деталей при степенях деформирования, сопоставимых с высотой исходного микропрофиля; выявить влияние степени осадки микропрофиля на изменение его формы при стесненных условиях нагружения; оценить напряженное состояние микропрофиля по интенсивности напряжений. Для расчета численной модели микропрофиля на поверхностях деталей использована программная среда ANSYS Workbench. В качестве материала микропрофиля применяли свинец, олово, алюминий и медь. Разработана компьютерная модель осадки микропрофиля при стесненных условиях нагружения. Установлено, что поднятие дна впадины начинается при осадке микропрофиля величиной 10–20% и достигает значений 0,213–0,275 мм от первоначальной высоты профиля в зависимости от его материала. Относительная длина сглаженного участка микропрофиля достигает 0,786–0,925 мм от его первоначальной длины. Угол при основании деформированного микропрофиля достиг 570 – для моделей из меди, и 800 – для моделей из свинца. Глубина пустот составляет от 1,4 мм – 23% от первоначальной высоты профиля для моделей из свинца, и 1,8 мм – 30% от первоначальной высоты профиля для моделей из меди. При максимальной осадке микропрофиля увеличение предела текучести материала микронеровностей с 10 до 60 МПа способствует снижению как угла при основании деформированного микропрофиля, так и относительной длины и вертикального подъема максимальной точки впадин микропрофиля. Установлено, что смыкания боковых поверхностей микропрофиля не произошло. Напряженное состояние микропрофиля при осадке на 50% превысило предел его прочности в 4–8 раз. Представлен характер формоизменения микропрофиля, смоделированного из пластичных металлических материалов. Установлено, что численный расчет хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований по моделям микропрофиля, выполненным из свинца. Необходимо отметить, что полное выглаживание микропрофиля, вероятно, произойдет от поднятия впадин и сближения его боковых поверхностей. Результаты исследования полезно использовать при проектировании и изготовлении затворных узлов трубопроводной арматуры.

Ключевые слова: микропрофиль поверхностей, моделирование шероховатости, конечно-элементное моделирование, упругопластическая деформация, стесненное деформирование

Для цитирования: Вулых Н. В., Вулых А. Н. Численный расчет напряженно-деформированного состояния микропрофиля при ортогональном воздействии в условиях стесненного нагружения // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 538–548. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548>.

Stress-strain numerical simulation for a microprofile subjected to orthogonal impact under constrained loading conditions

Nikolay V. Vulykh^{1✉}, Alexander N. Vulykh²

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky, Irkutsk district, Russia

¹vulix2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2607-4302>

²alex43zet@mail.ru

Abstract. The present paper aims to describe shape changes in a microroughness model developed for the working surfaces of parts at degrees of deformation commensurate with the height of the original microprofile; to establish how the degree of microprofile upsetting affects its shape under constrained loading conditions; as well as to estimate the stress state of the microprofile by stress intensity. A numerical model describing the surface microprofile of parts was calculated using the ANSYS Workbench environment. Lead, tin, aluminum, and copper were used as microprofile materials. In addition, microprofile upsetting was computer simulated under constrained loading conditions. The valley bottom was found to rise at a 10–20% microprofile upsetting by 0.213–0.275 mm relative to the original profile height, depending on its material. The relative length of the smoothed microprofile section amounted to 0.786–0.925 mm of its original length. The base angle of the deformed microprofile reached 57° and 80° for copper and lead models, respectively. The depth of valleys ranged from 1.4 mm (23% of the original profile height) for lead models and from 1.8 mm (30% of the original profile height) for copper models. In the case of maximum microprofile upsetting, an increase in the yield strength of microrough material from 10 to 60 MPa contributed to a reduction in the base angle of the deformed microprofile, as well as relative length and the vertical rise of microprofile valleys at their highest point. No interlocking of lateral microprofile surfaces was observed. At a 50% upsetting, the stress state of the microprofile exceeded its ultimate strength by 4–8 times. The shape changes simulated for the microprofile from plastic metallic materials are described. The performed numerical simulation correlates well with the experimental results obtained for lead microprofile models. It is worth noting that the complete smoothing of the microprofile is likely to occur through the rise of valleys and the approaching of its lateral surfaces. The study results can be used for designing and manufacturing valve gate assemblies.

Keywords: surface microprofile, roughness modeling, finite-element modeling, elasto-plastic strain, constrained deformation

For citation: Vulykh N. V., Vulykh A. N. Stress-strain numerical simulation for a microprofile subjected to orthogonal impact under constrained loading conditions. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):538-548. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-538-548>.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении окончательное придание формы деталям машин нередко происходит с помощью технологий, основанных на поверхностном пластическом деформировании. Часто в качестве инструмента, оказывающего воздействие на заготовку (деталь), применяют шарик, ролик, алмазный индентор, которые выполняют локальное силовое воздействие на заготовку. Направление воздействия происходит под прямым углом, т.е. является ортогональным. Очень часто при обработке деталей машин поверхностному слою последних не уделяется должного внимания, особенно в случае, когда величина деформирующего обжатия сопоставима со значением шероховатости

заготовки. По ряду причин формоизменение шероховатости заготовок при их деформировании мало изучено. Установлено [1–3], что после токарной обработки шероховатость приобретает регулярный треугольный микропрофиль в поперечном следу обработки направлении. Известно [3–5], что обработанные до значения шероховатости поверхности $R_z = 10\text{--}80$ изделия имеют регулярные выступы, позволяющие оказывать на них одновременное силовое воздействие со стороны инструмента, т.е. деформирующий инструмент может воздействовать на несколько микровыступов.

В данной работе будет решаться задача по формоизменению шероховатого слоя заготовки при силовом воздействии на нее, с

установлением геометрии формоизменения отдельных микровыступов. Величина осадки микропрофиля будет сравнима с его высотой.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет напряженно-деформированного состояния шероховатого слоя [6, 7] осуществлен посредством расчетной среды ANSYS Workbench [8].

Формоизменение микронеровностей осуществляли согласно схеме осадки шероховатой поверхности образца 3 жестким инструментом – индентором 1 (рис. 1). В данной работе программа ANSYS показывает вертикальное перемещение индентора и формоизменения микровыступов во времени.

Масштабный коэффициент микровыступов составлял 300. Высота микронеровностей h была 6 мм, длина одного микровыступа D – 20 мм, угол у основания α – 30° . Данные показатели микрорельефа являются фактическими (с учетом масштабного коэф-

фициента) после лезвийной обработки. Образцы изготавливали из мягких металлов. На производстве запорной арматуры прокладки из мягких металлов используют для герметизации сосудов высокого давления [9–12].

Величина угла деформирующего инструмента β (см. рис. 1) составляла 0° – для имитации деформирующего шарика или ролика с радиусом, позволяющим деформировать 5 микронеровностей образца 3 [13–16].

Величина подложки (слоя под микронеровностями) H (см. рис. 1) сравнима с высотой микронеровностей. Условия осадки микропрофиля – стесненные, так как взят фрагмент поверхностного слоя образца, а отсутствующая связь фрагмента с образцом заменена соответствующими граничными условиями, представленными ниже.

При осадке микропрофиля были следующие характеристики образца: тип – шероховатая пластина; диаграмма осадки материала – билинейная, остальные значения указаны в таблице.

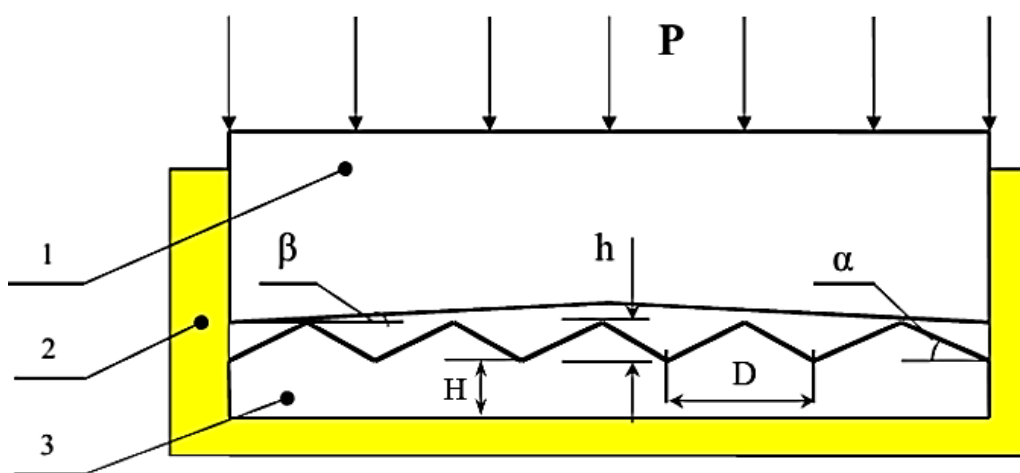


Рис. 1. Физическая модель нагружения микронеровностей жестким инструментом:

1 – индентор; 2 – корпус приспособления; 3 – образец

Fig. 1. Physical model of exposing microroughnesses to the rigid tool impact:

1 – indenter; 2 – device body; 3 – sample

Характеристики образцов

Sample characteristics

Материал	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Предел текучести, σ_T , МПа	Модуль упрочнения, E_T , МПа
Свинец	17000	0,42	10	200
Олово	55000	0,33	12	785
Алюминий	69000	0,33	30	1150
Медь	120000	0,33	60	3000

Параметры индентора: тип – пластина; материал – инструментальная сталь ШХ15; модуль упругости $E = 2.11 \times 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма осадки материала – билинейная, с пределом текучести $\sigma_T = 2000$ МПа модуль упрочнения $E_T = 20000$ МПа. Индентор принят жестким телом (рис. 2), имеющим 20 конечных элементов.

Условия выполнения осадки:

1) материал образцов и индентора – упруго-пластический;

2) коэффициент трения на контакте образца и индентора составлял $0,2^3$;

3) сетка на контактной поверхности образцов измельчена, см. рис. 2.

Граничные условия численного расчета приняты следующими (рис. 3):

1) движение по торцам образца ограни-

чивали по оси OX (Displacement C,D);

2) движение по боковым плоскостям ограничивали у образцов по оси OZ (Displacement E,F);

3) нижнюю опорную поверхность образца фиксировали (Fixed Support A).

4) Выполняли осадку микровыступов (см. рис. 3), задавая вертикальное смещение индентору на $0,5h$ (Joint-Displacement B), т.к. известно [9, 18, 19], что при малых толщинах подложки при перемещении индентора на превосходящую $0,5h$ величину может произойти полное смятие микропрофиля. Это, во-первых, не даст возможности увидеть картину деформированного микропрофиля и, во-вторых, приведет к фатальной ошибке при решении задачи [8].

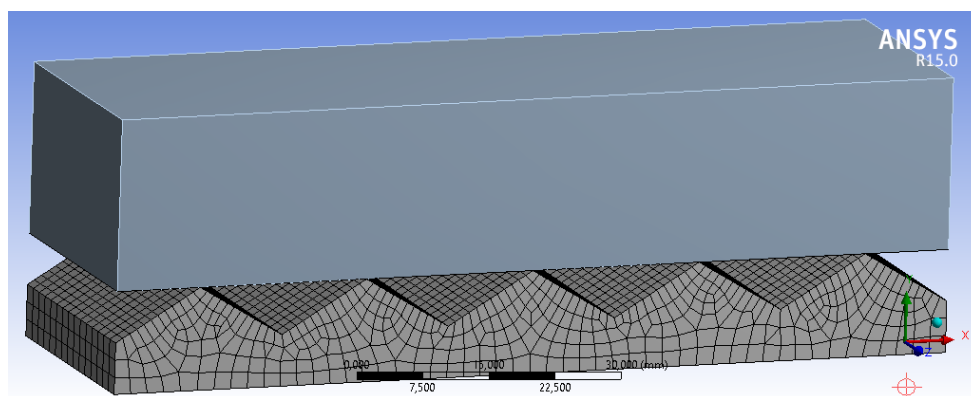


Рис. 2. Вид конечноэлементной сетки образца (число конечных элементов – 5576, узлов – 27445)
Fig. 2. Sample finite-element grid (5,576 finite elements; 27,445 nodes)

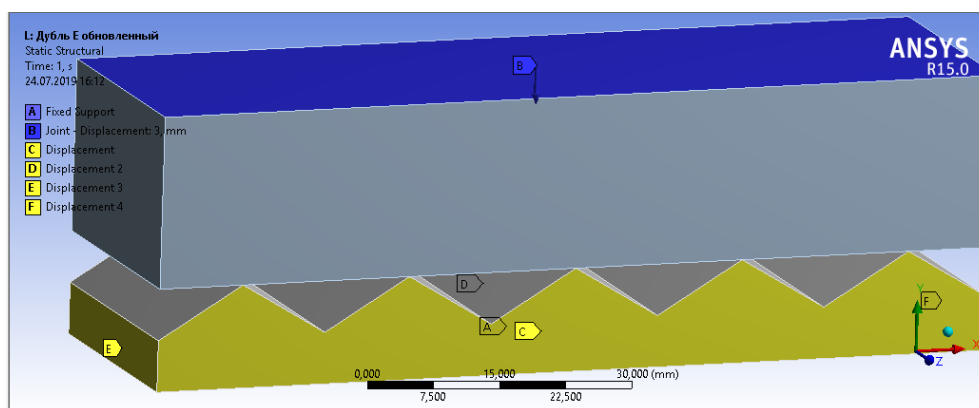


Рис. 3. Способ задания граничных условий и нагрузки
Fig. 3. Method for setting boundary conditions and load

³ Крагельский И. В., Виноградова И. В. Коэффициенты трения: справ. пособ. М.: Изд-во «Машгиз», 1962. 220 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние предела текучести модели микронеровностей на относительную длину сглаженного участка I_D , вертикальное смещение точки впадин микропрофиля I_h и изменение угла при основании деформированного микропрофиля α_d при осадке микропрофиля на 50% представлено на рис. 4, где $I_D = \frac{D_i}{D}$; $I_h = \frac{S_i}{h}$; $\cos \alpha_d = \frac{D/2 - D_i/2}{k_i}$; $\varepsilon_h = 100\%$ при $h = 6$ мм. Вышеуказанные параметры представлены на рис. 1 и 5.

По наблюдениям (см. рис. 4), при максимальной осадке микропрофиля увеличение предела текучести модели микронеровностей с 10 до 60 МПа способствует снижению как угла у основания деформированного микропрофиля, так и относительной длины сглаженного участка и вертикального подъема точки впадин микропрофиля. Это свидетельствует о том, что чем прочнее микропрофиль, тем в большей степени он сохраняет свою исходную форму.

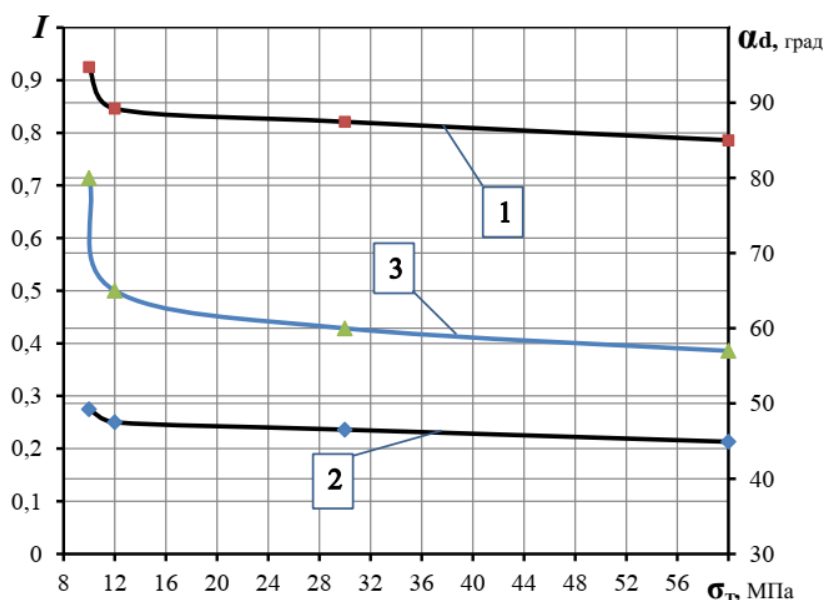


Рис. 4. Влияние предела текучести модели микронеровностей на относительную длину сглаженного участка I_D – 1; вертикальное смещение впадины I_h – 2; угол при основании микропрофиля α_d – 3
Fig. 4. Impact of the yield stress of the microroughness model on the relative length of the smoothed section I_D – 1; valley vertical displacement I_h – 2; microprofile base angle α_d – 3

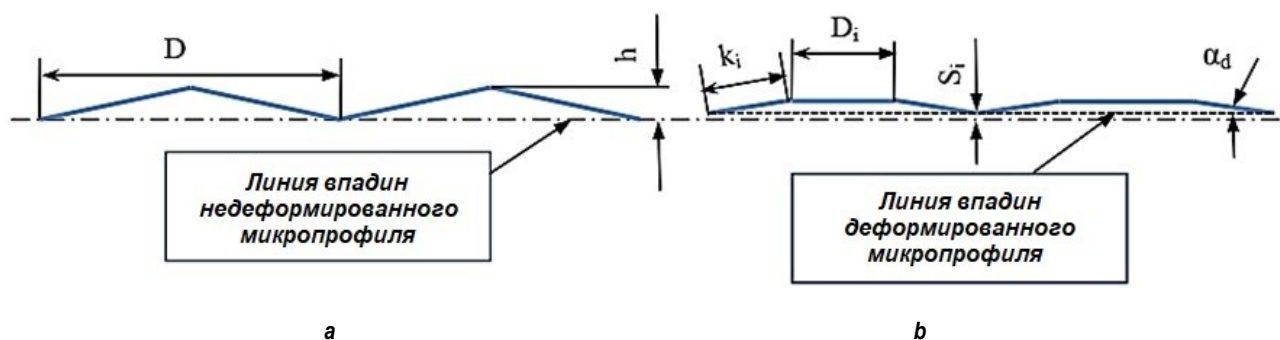


Рис. 5. Схема формоизменения модели шероховатости: а – недеформированный профиль, б – профиль после i -го деформирования; D – длина единичного выступа микропрофиля; D_i – длина сглаженного участка микропрофиля после i -го деформирования; h – высота микропрофиля; S_i – величина подъема впадины после i -го деформирования; α_d – угол при основании деформированного микропрофиля
Fig. 5. Diagram of roughness model shape change: а – undeformed profile; б – profile after the i^{th} strain; D – length of the microprofile single asperity; D_i – length of the microprofile smoothed section after the i^{th} strain; h – microprofile height; S_i – valley elevation after the i^{th} strain; α_d – deformed microprofile base angle

Кроме того, необходимо отметить, что с увеличением предела текучести модели микронеровностей с 10 до 12 МПа (при переходе материала модели микронеровностей от свинца к олову) произошла значительная стабилизация формы микропрофиля, а именно: относительная длина деформированного микропрофиля уменьшилась с 0,92 до 0,846 – на 8,5%; вертикальное перемещение точки впадин микропрофиля уменьшилось с 0,28 до 0,25 – на 9%; угол у основания деформированного микропрофиля уменьшился с 80 до 65° – на 19%. Данное снижение формоизменения микропрофиля при деформировании можно объяснить значительным повышением его упругих свойств. Так, если у свинца модуль упругости составлял 17000 МПа, то у олова он составлял 55000 МПа. Кроме того, модуль упрочнения олова (785 МПа) почти в 4 раза превышает модуль упрочнения свинца (200 МПа), см. таблицу.

На рис. 6, по причине симметричности модели микронеровностей, показаны половинки изополос деформированного микропрофиля, изготовленного из свинца (как более пластичного материала) и меди (как более прочного материала), представляющего картину деформированного состояния в экстремальных значениях. Изополосы показаны для вертикального (оУ) и горизонтального (оХ) направлений деформирования микронеровностей до 50%.

По результатам картин изополос виден механизм пластического формоизменения микровыступов: по горизонтали – от 0,9 мм – для меди и до 1,05 мм – для свинца, симметрично от пика микронеровности (см. рис. 6), а также смятие пика микропрофиля порядка 3 мм (0,5h). Из анализа изополос виден подъем впадин микропрофиля, при этом осталась незначительная площадь пустот. Глубина пустот составила около 1,4 мм – 23% от начальной высоты профиля у микропрофиля

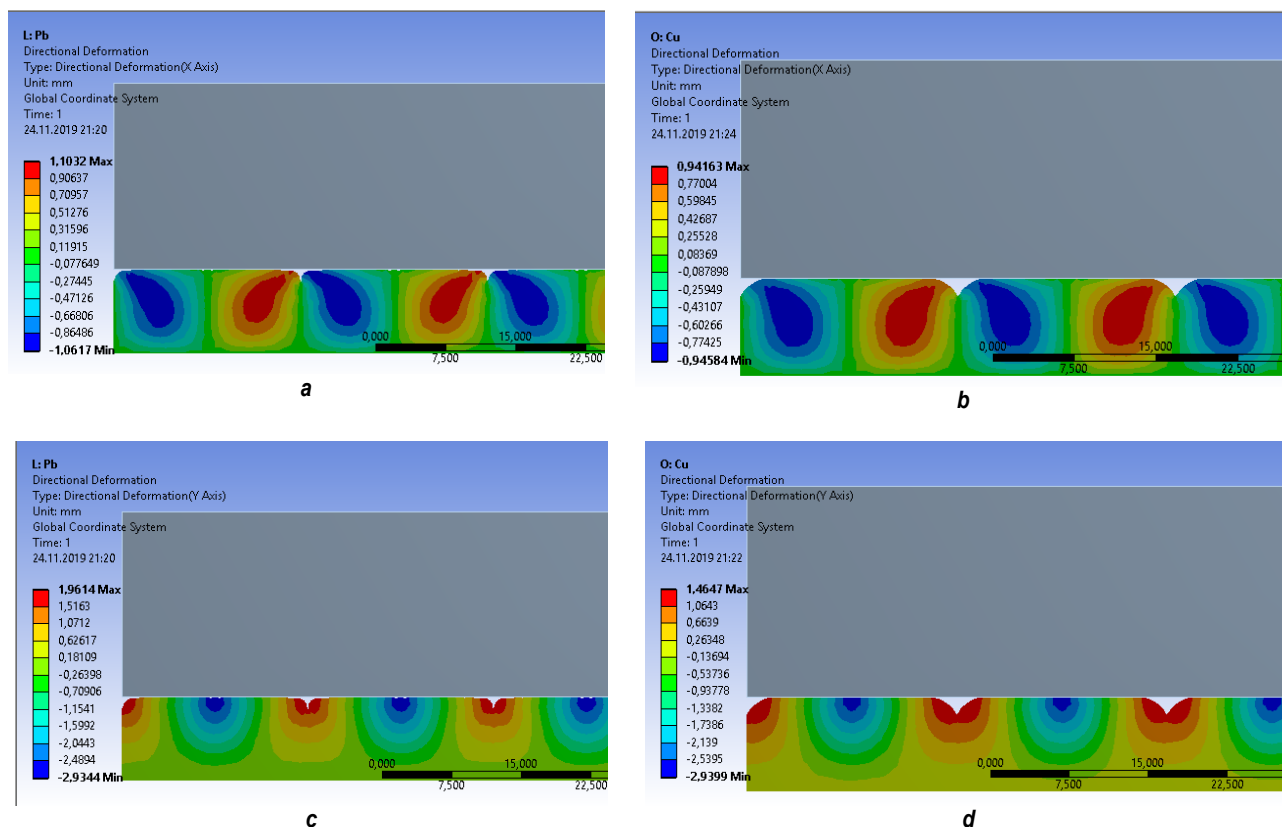


Рис. 6. Участки распределения пластических деформаций микропрофиля: направление оХ, $\epsilon_h = 50\%$ (а – свинец, б – медь); направление оУ, $\epsilon_h = 50\%$ (с – свинец, д – медь)
Fig. 6. Distribution areas of microprofile plastic deformations: oX direction, $\epsilon_h = 50\%$ (a – lead, b – copper); oY direction, $\epsilon_h = 50\%$ (c – lead, d – copper)

из свинца, и 1,8 мм – 30% от начальной высоты профиля у микропрофиля из меди. В первом приближении, основываясь на величине глубины пустот и длине сглаженного участка микропрофиля при его деформировании на 50%, можно заключить (см. рис. 4, 6), что площадь пустот микропрофиля из ме-

ди превышает площадь пустот микропрофиля из свинца в 3,5–4 раза.

Степень упрочнения материала микропрофиля определяли по интенсивности напряжений, определяемой по формуле Губера–Мизеса [20]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}. \quad (1)$$

На рис. 7 показано влияние степени осадки микронеровностей ε_n на интенсивность напряжений σ_i .

Изополосы интенсивности напряжений микронеровностей σ_i представлены на рис. 8 при деформировании на 25 и 50%, соответственно.

Как видно из графика (см. рис. 7), с возрастанием степени осадки микропрофиля происходит увеличение интенсивности напряжений, причем до величины осадки в 20% напряженное состояние (НС) под пиками возрастает сильнее, затем интенсивность возрастания падает. При деформировании микропрофиля свыше 40% интенсивность напряжений вновь возрастает в 1,1–1,2 раза. Увеличение НС под впадинами микронеровностей было практически линейным до величины осадки микропрофиля в 40–45%, затем градиент интенсивности возрастания увеличился.

На изополосах (см. рис. 8) видно, что с начала осадки напряженная область была на расстоянии порядка 0,1h (см. рис. 1) от зоны контакта с индентором. При деформации микропрофиля в 25% напряженная зона под пиками микропрофиля начинает распространяться в горизонтальном направлении. Достигнув 40% осадки, напряженная зона под пиками микропрофиля возросла в плоскости XOY, при этом произошло формирование напряженной области и во впадинах микропрофиля. Достигнув 50% величины осадки, напряженные зоны, сформированные под пиками микронеровностей, касаются впадин. В результате этого картина НС во впадинах изменилась следующим образом: для микро-

профиля из свинца НС превысило на 20% НС под пиками микропрофиля, у микропрофиля из олова и алюминия НС под пиками и во впадинах было примерно одинаковым, а для микропрофиля из меди НС под пиками превышало НС во впадинах на 20% (см. рис. 7, 8), что может быть обусловлено меньшей пластической текучестью и максимальным модулем упрочнения более прочного микропрофиля [1].

Установлено, что при стесненном деформировании НС микропрофиля, в зависимости от расстояния до контактной поверхности с индентором, превысило в 4–8 раз предел прочности материала микронеровностей.

В работах [13, 14] для стесненных условий деформирования установлено, что возрастание величины упрочнения материала микронеровностей прямо пропорционально зависит от величины деформирования и может превышать предел прочности материала в 4–5 раз, что согласуется с результатами данной работы.

Необходимо указать, что численный расчет подтверждает экспериментальные значения по изготовленным из свинца микронеровностям [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подъем микровпадины, в зависимости от материала, начинается при 10–20% осадке микровыступов и доходит до 0,21–0,28 от его начальной высоты.

2. Относительная длина сглаженного участка микронеровностей составила 0,78–0,92 от первоначальной его длины, в зависимости от материала микронеровностей.

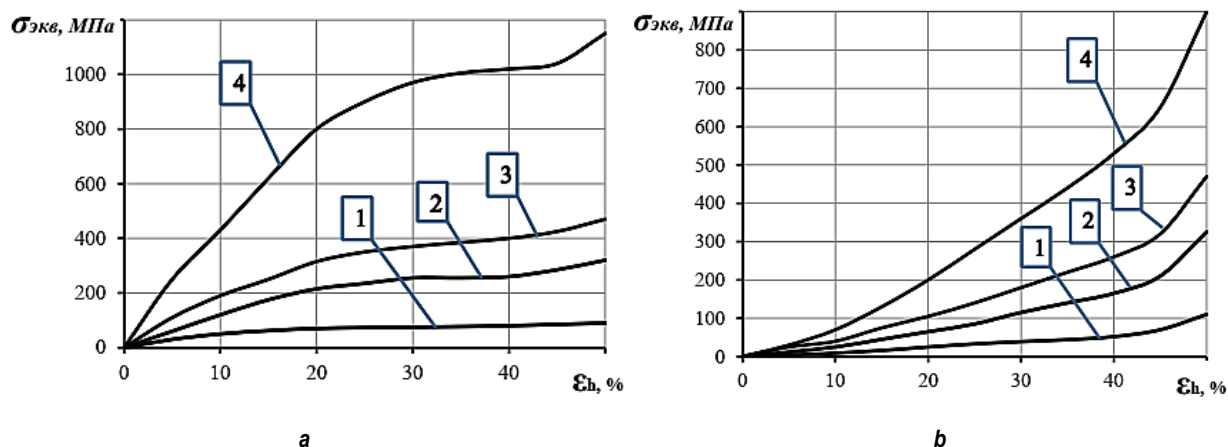


Рис. 7. Влияние степени деформирования микропрофиля на максимальную интенсивность напряжений (1 – свинец; 2 – олово; 3 – алюминий; 4 – медь): а – под вершиной микропрофиля; б – под впадиной микропрофиля
 Fig. 7. Influence of the microprofile deformation degree on the maximum stress intensity (1 – lead; 2 – tin; 3 – aluminum; 4 – copper): а – under the microprofile top; б – under the microprofile valley

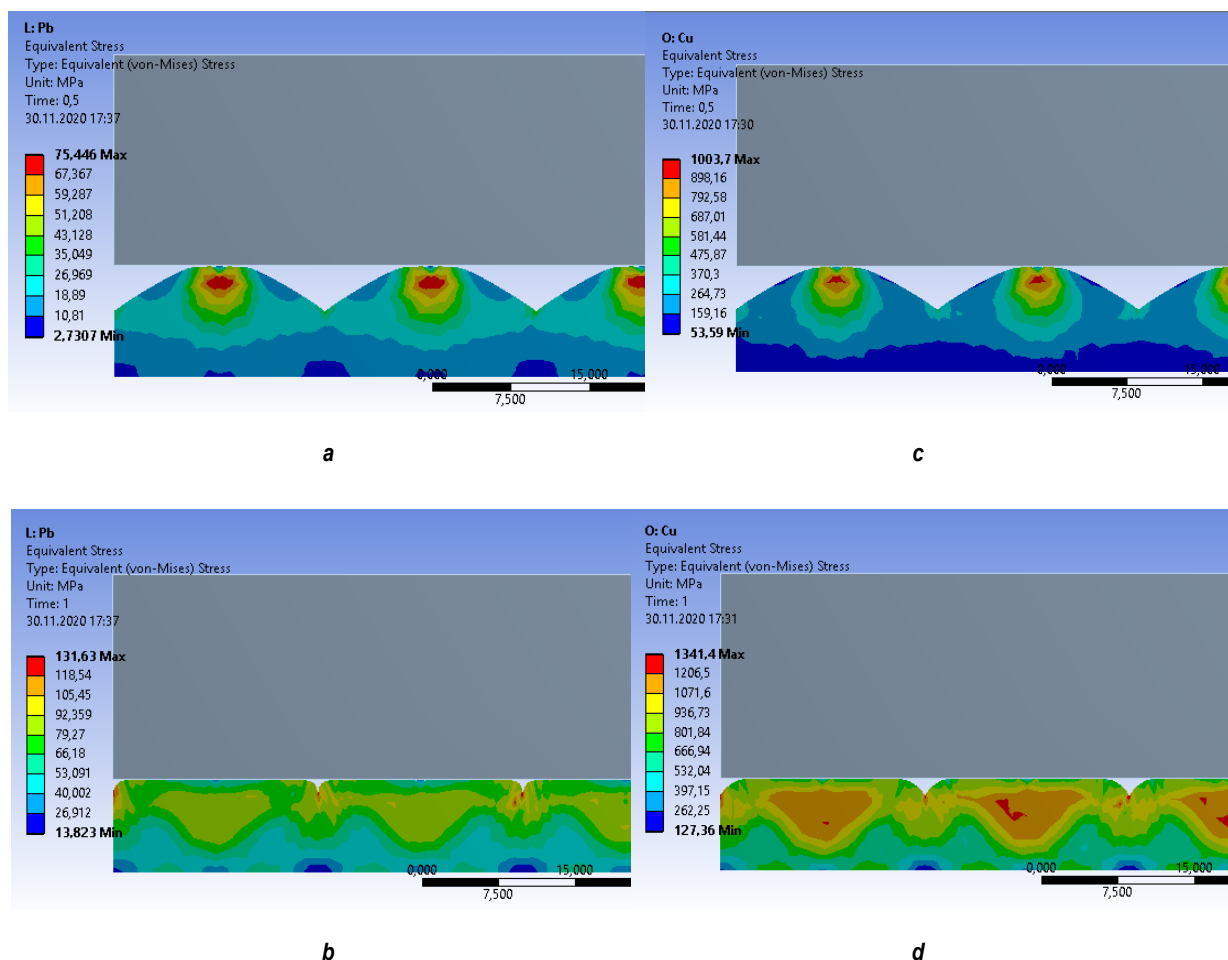


Рис. 8. Участки распределения интенсивности напряжений микропрофиля σ_i :
 $\varepsilon_h = 25\%$ (а – свинец, с – медь); $\varepsilon_h = 50\%$ (б – свинец, д – медь)
 Fig. 8. Distribution areas of microprofile stress intensity σ_i :
 $\varepsilon_h = 25\%$ (а – lead, с – copper); $\varepsilon_h = 50\%$ (б – lead, д – copper)

3. Угол у основания деформированных микронеровностей составил 57° – для моделей из меди и 80° – для моделей из свинца.

4. Глубина пустот микронеровностей составила 1,4 мм – 23% от начальной высоты профиля для моделей из свинца и 1,8 мм – 30% от начальной высоты профиля для моделей из меди.

5. При осадке микропрофиля в 50% повышение предела текучести модели микровыступов с 10 до 60 МПа способствует снижению как угла при основании деформированного микропрофиля, так и относительной длины и вертикального подъема точки впадин микропрофиля. Также наблюдалось уменьшение площади пустот микропрофиля в 3,5–4 раза.

6. Установлено, что НС микровыступов при осадке на 50% превзошло предел его прочности в 4–8 раз, причем НС во впадинах изменялось: возрастало на 20% относительно вершин микронеровностей – для наиме-

нее прочного материала микропрофиля, а также снижалось на 20% относительно вершин микронеровностей – для наиболее прочного.

7. Численный расчет показал, что при величине осадки микропрофиля на 50% полного выглаживания микровыступов не состоялось. Таким образом, теоретически, при назначении режимов отделочно-упрочняющей обработки при обжати на 50% от исходного значения шероховатости на микропрофиле будут оставаться микропустоты, которые впоследствии могут играть роль «масляных карманов» при работе пар трения. Также решение данной задачи может быть применено при проектировании запирающих элементов затворного узла трубопроводной арматуры и регулировке усилия записания затворного узла относительно начальной шероховатости контактных поверхностей.

Список источников

1. Проскуряков Ю. Г. технология упрочняющей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971. 207 с.
2. El-Tahawy M., Pereira P. H. R., Huang Yi, Park H., Choe Heeman, Langdon T. G., et al. Exceptionally high strength and good ductility in an ultrafine-grained 316L steel processed by severe plastic deformation and subsequent annealing // *Materials Letters*. 2018. Vol. 214. P. 240–242. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.040>.
3. Никитин Г. С., Галкин М. П., Жихарев П. Ю. Влияние внеконтактных зон на усилия деформирования в процессах обработки металлов давлением // *Металлург*. 2012. № 10. С. 61–65. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18528138>.
4. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. М.: Изд-во «Наука», 1970. 227 с.
5. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Изд-во «Машиностроение», 1972. 240 с.
6. Вулых Н. В. Анализ напряженного состояния шероховатого слоя при локальном и осесимметричном пластическом деформировании // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017;21(11):17–26. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-17-26>.
7. Нго Као Кыонг, Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Оценка качества упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании роликами разных конструкций // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 1. С. 30–37. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37>.
8. Chen Xiaolin, Liu Yijun. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench: «CRC Press», 2014. 411 p.
9. Огар П. М., Тарасов В. А., Межецкий В. И. Герметичность затворов арматуры и сосудов высокого давления // *Проблемы механики современных машин: матер. V Междунар. конф. (г. Улан-Удэ, 25–30 июня 2012 г.)*. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. С. 24–27. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381319>.
10. Nikolaeva E. P., Mashukov A. N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53. Iss. 7-8. P. 459–463. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0363-1>.
11. 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. No. 1. P. 012104. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>.
12. Gridin G. D. New in development of high-pressure angle shutoff valves // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2012. Vol. 47. No. 9-10. P. 683–686.
13. Vulykh N. V., Vulykh A. N. Computer Simulation of Microprofile Strain Under Orthogonal Impact at Constrained Load. Part 1 // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_103.

14. Vulykh N. V. Centrifugal Rolling of Flexible Shafts for Achieving Best Possible Roughness of the Surface // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_115.
15. Zaides S. A., Pham Van Anh. Improvement of calibrated steel quality by surface deformation. Part 1: Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation // Steel in Translation. 2020. Vol. 50. P. 745–749. <https://doi.org/10.3103/S0967091220110145>.
16. Zaides S. A., Le Hong Quang. State of stress in cylindrical parts during transverse straightening // Russian Metallurgy (Metally). 2019. Vol. 13. P. 1487–1491. <https://doi.org/10.1134/S003602951913041X>.
17. Кузьменко А. Г. Глобальный и локальный коэффициенты трения и объяснение их зависимости от давления // Проблемы трибологии. 2008. № 2. С. 69–88.

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19119568>.
18. Вулых Н. В., Рыжиков И. Н., Пэй Цаоцао, Сайганов Т. М. Определение критического перемещения штампа при деформировании идеально жесткопластического микропрофиля при стесненных условиях нагружения // Жизненный цикл конструкционных материалов: матер. IX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2019. С. 154–158.
19. Vulykh N. V. Microprofile model form changing research at axisymmetric deformation with account of scale factor // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_121.
20. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Изд-во «Высшая школа», 1970. 288 с.

References

1. Proskuryakov Y. G. *Technology of hardening and gaging treatment of metals*. Moscow: Mashinostroenie; 1971, 207 p. (In Russ.).
2. El-Tahawy M., Pereira P. H. R., Huang Yi, Park H., Choe Heeman, Langdon T. G., et al. Exceptionally high strength and good ductility in an ultrafine-grained 316L steel processed by severe plastic deformation and subsequent annealing. *Materials Letters*. 2018;214:240-242. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.040>.
3. Nikitin G. S., Galkin M. P., Zhikharev P. Yu. Effect of out-of-contact zones on deforming forces at metal forming processes. *Metallurg*. 2012;10:61-65. (In Russ.).
4. Demkin N. B. *Rough surface contacting*. Moscow: Nauka; 1970, 227 p. (In Russ.).
5. Schneider Y. G. *Formation of regular microreliefs on parts and their operation properties*. Leningrad: Mashinostroenie; 1972, 240 p. (In Russ.).
6. Vulykh N. V. Analysis of rough layer stressed state at local and axisymmetric plastic deformation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(11):17-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-17-26>.
7. Ngo Cao Cuong, Zaides S. A., Le Hong Quang. Hardened layer quality evaluation at surface plastic deformation by rollers of different designs. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(1):30-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-30-37>.
8. Chen Xiaolin, Liu Yijun. *Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench*: CRC Press; 2014, 411 p.
9. Ogar P. M., Tarasov V. A., Mezhechkij V. I. *Impermeability of set valves and high pressure vessels*. In: *Problemy mekhaniki sovremennyh mashin: materialy V Mezhdunarodnoj konferencii = Problems of*

modern machinery mechanics: materials of the 5th International conference. 25–30 June 2012, Ulan-Ude. Ulan-Ude: East Siberia State University of Technology and Management; 2012, p. 24-27. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381319>.
10. Nikolaeva E. P., Mashukov A. N. Evaluation of residual stresses in high-pressure valve seat surfacing. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017;53(7-8):459-463. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0363-1>.
11. 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;944(1):012104. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>.
12. Gridin G. D. New in development of high-pressure angle shutoff valves. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2012;47(9-10):683-686.
13. Vulykh N. V., Vulykh A. N. Computer simulation of microprofile strain under orthogonal impact at constrained load. Part 1. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_103.
14. Vulykh N. V. Centrifugal rolling of flexible shafts for achieving best possible roughness of the surface. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_115.
15. Zaides S.A., Pham Van Anh. Improvement of calibrated steel quality by surface deformation. Part 1: Determination of the stress state of cylindrical parts during orbital surface deformation. *Steel in Translation*. 2020;50:745-749.

<https://doi.org/10.3103/S0967091220110145>.

16. Zaides S. A., Le Hong Quang. State of stress in cylindrical parts during transverse straightening. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;2019(13):1487-1491. <https://doi.org/10.1134/S003602951913041X>.

17. Kuzmenko A. G. Global and local coefficients of friction and explanation of their dependence on pressure. *Problemy tribologii = Problems of tribology*. 2008;2:69-88. (In Russ.).

18. Vulykh N. V., Ryzhikov I. N., Pei Caocao, Saiganov T. M. Determination of the critical displacement under deformation of a microprofile ideally rigid-plastic under constrained loading conditions. In: *Zhiznennyj tsikl konstruktsionnykh materialov: materialy IX Vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym*

uchastiem = The Lifecycle of Structural Materials: proceedings of the 9th All-Russian scientific and technical conference with international participation. 24–26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, p. 154-158. (In Russ.).

19. Vulykh N. V. Microprofile model form changing research at axisymmetric deformation with account of scale factor. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_121.

20. Samul V. I. *Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity*. Moscow: Vysshaya shkola; 1970, 288 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вулых Николай Валерьевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры машиностроительных
технологий и материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вулых Александр Николаевич,

студент,
Иркутский государственный аграрный
университет им. А. А. Ежевского,
664038, Иркутская область, Иркутский р-н,
п. Молодежный, 1/1, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 08.10.2021; принята к публикации 27.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay V. Vulykh,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Engineering Technologies and Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Alexander N. Vulykh,

Student,
Irkutsk State Agrarian University named after
A. A. Ezhevsky,
1/1, Molodezhny settlement, Irkutsk region,
Irkutsk district, 664038, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 08.10.2021; accepted for publication 27.10.2021.

Научная статья

УДК 621.914

<http://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-549-558>

Исследование влияния зажимных патронов на устойчивость процесса фрезерования

Алексей Сергеевич Пятых^{1✉}, Петр Петрович Шапарев²^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия¹ pyatykhas@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>² shaparev.petr@mail.ru

Аннотация. Цель – исследовать влияние инструментального зажимного патрона на динамическую устойчивость процесса фрезерования концевой фрезой заготовки из алюминиевого деформируемого сплава В95пчТ2. Для оценки динамической устойчивости применялся анализ разложенного в ряд Фурье сигнала, записанного в процессе фрезерования с помощью инструментального узконаправленного микрофона Shure PGA81-XLR. Фрезерование выполнялось на высокопроизводительном обрабатывающем центре HSC75 linear цельной твердосплавной концевой фрезой, выполненной из твердого сплава H10F. Режимы резания рассчитывались на основании диаграммы устойчивого резания, построенной по результатам операционного модального анализа технологической системы. Измерение шероховатости поверхности выполнялось контактным профилометром Taylor Hobson Form Talysurf i200. В качестве критериев оценки эффективности процесса резания использовались производительность, определяемая скоростью съема материала, и качество обработанной поверхности, устанавливаемое параметром шероховатости. Показана связь типа инструментального зажимного патрона, используемого для закрепления концевой фрезы, со скоростью съема материала и шероховатостью обработанной поверхности. Установлено, что для инструментальной наладки на базе силового зажимного патрона области стабильного резания, рассчитанные при ширине резания 16 мм и подаче резания 0,1 мм/зуб, соответствуют максимально возможной глубине резания равной 5,6 мм. При этом для остальных рассматриваемых патронов данный показатель меньше на 20–30%. В результате концевой фрезерования наладкой на базе силового патрона с цельной твердосплавной фрезой диаметром 16 мм и тремя режущими зубьями обеспечивается динамически устойчивое резание с наибольшей скоростью съема материала (575,6 см³/мин) и минимальной шероховатостью поверхности (0,56 мкм). На основании проведенного анализа для операции концевой фрезерования на станке с числовым программным управлением рекомендован выбор инструментального зажимного патрона силового типа, обеспечивающий повышение производительности фрезерования (свыше 25% относительно рассматриваемых инструментальных наладок). При этом сохраняется качество обрабатываемой поверхности и увеличивается стойкость режущего инструмента за счет динамически стабильного резания.

Ключевые слова: зажимной патрон, силовой патрон, вибрации, динамическая устойчивость, модальный анализ, концевая фреза

Для цитирования: Пятых А. С., Шапарев П. П. Исследование влияния зажимного патрона на устойчивость процесса фрезерования // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 549–558. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-549-558>

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Investigating the impact of chucks on the stability of a milling process

Aleksey S. Pyatykh^{1✉}, Petr P. Shaparev²^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹ pyatykhas@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>² shaparev.petr@mail.ru

© Пятых А. С., Шапарев П. П., 2021

<https://vestirgtu.elpub.ru>

Abstract: The impact of a tool chuck on the dynamic stability of a milling process with an end mill was investigated using a workpiece made of aluminium wrought alloy V95pchT2. To assess the dynamic stability, we analysed a Fourier-transformed signal recorded during milling using a Shure PGA81-XLR tool directional microphone. The milling was performed on an HSC75 linear high-production machining centre with an H10F solid carbide end mill. Cutting conditions were calculated based on a stability diagram derived from an operational modal analysis of a manufacturing system. The surface roughness was measured with a Taylor Hobson Form Talysurf i200 contact profilometer. Performance defined by the rate of material removal and the roughness of a treated surface was used to evaluate the cutting process. A correlation was found between the type of tool chuck fixating the end mill, the rate of material removal and the roughness of the machined surface. It was found that, for milling using a power chuck, the areas of stable cutting correspond to the maximum cutting depth equal to 5.6 mm at a cutting width of 16 mm and a cutting feed of 0.1 mm/rev. However, for the other studied chucks, this indicator was 20 to 30% lower. End milling conducted using a power chuck with a solid carbide cutter with a diameter of 16 mm and three cutting teeth resulted in dynamically stable cutting with the highest material removal rate (575.6 cm³/min) and minimum surface roughness (0.56 µm). Based on the conducted analysis, for the operation of end milling on a machine with computerised numerical control (CNC), a power tool chuck is recommended that improves milling performance by over 25% relative to the considered tool setups. Furthermore, this preserves the quality of a treated surface and increases the tool cutting life owing to dynamically stable cutting.

Keywords: clamping chuck, power chuck, vibrations, dynamic stability, modal analysis, end mill

For citation: Pyatykh A. S., Shaparev P. P. Investigating the impact of chucks on the stability of a milling process. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):549-558. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-549-558>.

ВВЕДЕНИЕ

Современная машиностроительная промышленность направлена на достижение максимальной производительности и снижение экономических затрат. Применяемые на производстве обрабатывающие центры оснащаются прогрессивным режущим инструментом, тем не менее, должного эффекта на производстве не удается достичь в полной мере. Основным сдерживающим фактором повышения производительности по-прежнему являются вибрации. Вибрации ограничивают режимы резания при обработке (особенно скорость и глубину резания), приводят к дефектам поверхности детали, повышенному наклепу поверхностных слоев, снижению точности обработки, стойкости режущего инструмента, рассогласованию соединений станка и ускоренному износу механизмов. Имеющиеся в открытой печати исследования посвящены вопросам моделирования динамики технологической системы, разработке способов гашения вибраций при механической обработке. Часто результаты исследований имеют должный эффект только в идеальных лабораторных условиях и невозможны к применению в условиях производства.

ВИБРАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Вибрации представляют собой колебательные движения инструмента, заготовки

или механизмов станка, характеризующиеся такими параметрами как частота, амплитуда, скорость и ускорение. Признаком вибраций являются линии (строчка, дробление) или риски на обработанной поверхности, располагающиеся с равным интервалом, величина которых зависит от периодичности их возникновения (рис. 1).

Исследование причин возникновения вибраций и способов их подавления отражено в трудах таких авторов как Е. Будак, Ю. Алтинтас, К. Янг, М. Сидпура, Р. Пауробалли [1–9]. В работе [10] авторы разделили методы борьбы с вибрациями на две категории: технологические и конструктивные. К технологическим методам относится изменение режимов резания и углов заточки режущих инструментов. Для конструктивных методов характерно повышение жесткости всех элементов технологической системы и рассеивание энергии колебаний системы за счет использования различных виброгасителей. При этом эффективное изменение режимов резания возможно только в результате проведения большого количества исследований, позволяющих определить оптимальные условия резания для каждого материала, режущего инструмента, станка. А оснащение современного производства режущим инструментом со сменными пластинами ограничивает возможность переточки углов.

В работе [11] автор описывает исследование автоколебаний на примере концевой

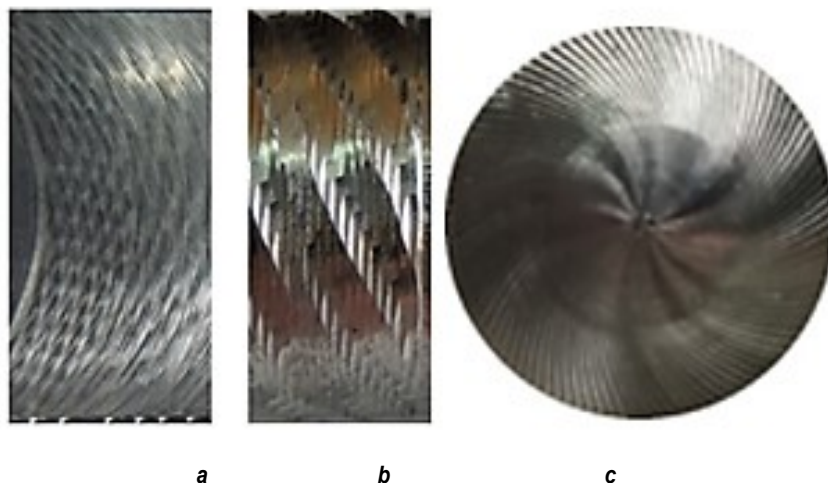


Рис. 1. Следы возникновения вибраций: а – при фрезеровании; б – при точении; с – при сверлении
Fig. 1. Vibration traces when: a – milling; b – turning; c – drilling

фрезерования и делает вывод о том, что автоколебания напрямую зависят от подачи и скорости резания. Для того чтобы не допустить проявления автоколебаний в процессе обработки, автор предлагает использовать модуляцию скорости резания. В качестве примера эффективного использования данного метода в статье описан процесс обработки с высокой подачей инструмента с модуляцией скорости резания, что позволило стабилизировать процесс и загасить автоколебания.

Несмотря на то, что данный метод дал положительные результаты, его сложность заключается в том, что модуляцию скорости резания необходимо находить опытным путем – для каждого материала и вида обработки она будет различна, что накладывает некоторые ограничения на применение данного метода на производстве.

В настоящий момент современные станки с числовым программным управлением позволяют прямо на пульте управления не только писать управляющие для обработки деталей, но и программировать модуляцию скорости резания в процессе обработки, и, как следствие, гасить регенеративные колебания [12]. При этом модуляция скорости резания программно реализована только на токарных операциях.

Одним из эффективных способов подавления регенеративных колебаний является способ SSV (от англ. Spindle Speed Variation)

– периодическое изменение частоты вращения шпинделя во времени [13–15]. В рамках исследований данный способ показал положительный результат по уменьшению проявления автоколебаний в процессе резания. Особенностью данного способа является то, что его можно запрограммировать на стойке станка. Однако он остается наиболее сложным, требующим определенных навыков и знаний оператора, и пока что не может в полной мере быть применен на производстве.

Периодическое изменение частоты вращения шпинделя может быть реализовано по синусоидальному закону SSSV (от англ. Sinusoidal Spindle Speed Variation) или же в определенном диапазоне частот случайным образом MRSSV (от англ. Multi-level Random Spindle Speed Variation). Результаты исследований показывают, что гашение вибраций способом SSSV эффективнее, чем способом MRSSV. Однако в случае высокоскоростной обработки способы SSV требуют большой амплитуды и частоты, которые могут быть ограничены системой привода шпинделя [16].

В процессе фрезерования тонкостенных деталей возникают вибрации, которые препятствуют получению требуемой шероховатости поверхности. В таких случаях эффективно применяются пассивные демпфирующие устройства с регулируемой жесткостью [17]. Многочисленные эксперименты показывают, что режущая система более устойчи-

вая при использовании пассивного демпфера.

Свою эффективность в гашении колебаний доказали способы, основанные на математическом анализе модальных параметров режущего инструмента и обрабатываемой заготовки. В результате строится диаграмма устойчивости, а также определяются режимы резания, при которых наблюдается стабильное резание. Эффективность данного способа подтверждена многочисленными исследованиями российских и зарубежных авторов [18–21]. Однако даже если правильно подобраны режимы резания, есть вероятность проявления колебаний в процессе обработки, причина которых связана с демпфирующими свойствами технологической системы.

Отметим следующее: несмотря на то, что упомянутые выше исследования были посвящены разработке эффективных методов подавления вибраций, оптимизации конструкции режущего инструмента, они не учитывали влияния способа закрепления режущего инструмента в шпинделе станка на возникновение вибраций. Чаще всего в исследованиях закрепление принимается идеаль-

но жестким, и все внимание концентрируется на режущей части инструмента. Как показывают результаты данного исследования, такой подход является неполным. Подбор оптимального патрона для закрепления режущего инструмента позволит снизить вероятность возникновения вибраций без проведения сложных математических расчетов в условиях реального производства.

ПЛАНИРОВАНИЕ И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование выполнялось на фрезерном обрабатывающем центре HSC75V linear. Заготовка представляла собой блок из алюминиевого деформируемого сплава В95пчТ2. Резание выполнялось концевой фрезой (табл. 1). Закрепление инструмента осуществлялось в патронах Haimer A63.140.16 (термопатрон), CoroChuck 930-HA06-HD20-104 (гидропластовый патрон), Showa HSKA63-HPC16S-110 AA (силовой патрон) и Shunk 204055 (гидропластовый патрон) (рис. 2). Перед началом работы все инструментальные наладки были отбалансированы.



Рис. 2. Зажимные патроны: а – Shunk 204055; б – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA; в – CoroChuck 930-HA06-HD20-104; д – Haimer A63.140.16

Fig. 2. Clamping chucks: а – Shunk 204055; б – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA; в – CoroChuck 930-HA06-HD20-104; д – Haimer A63.140.16

Таблица 1. Геометрические параметры фрезы
Table 1. Geometrical parameters of the cutter

Параметр	Ед. измерения	Величина
Диаметр, d	мм	16
Число зубьев, z	шт.	3
Передний угол в торцевом сечении, γ_T	град.	13,5
Передний угол в радиальном сечении, γ_r	град.	10,5
Задний угол в торцевом сечении, α_T	град.	12
Задний угол в радиальном сечении, α_r	град.	8
Угол наклона винтовой канавки, α	град.	40
Материал сплава	–	H10F

Для каждой инструментальной наладки были определены модальные параметры и построены диаграммы устойчивости с начальными условиями: $a_e = 16$ мм, $f_z = 0,1$ мм/зуб (рис. 3).

На основании диаграммы устойчивого резания и рекомендаций производителя инструмента были определены режимы резания (табл. 2).

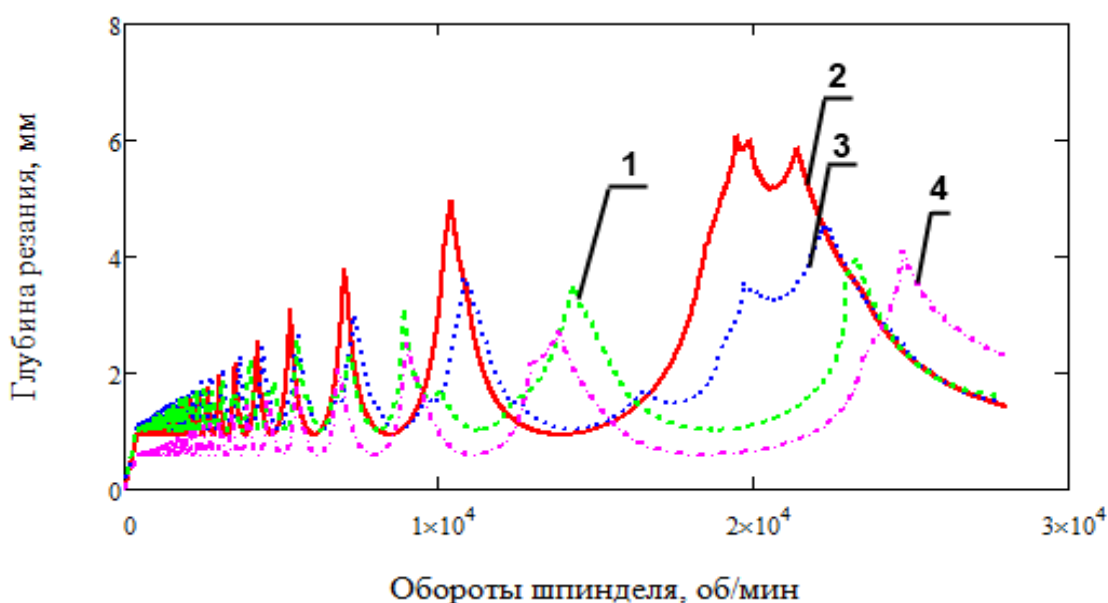


Рис. 3. Диаграмма устойчивого резания: 1 – Shunk 204055; 2 – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA; 3 – CoroChuck 930-NA06-HD20-104; 4 – Haimer A63.140.16

Fig. 3. Diagram of stable cutting: 1 – Shunk 204055; 2 – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA; 3 – CoroChuck 930-NA06-HD20-104; 4 – Haimer A63.140.16

Таблица 2. Режимы резания
Table 2. Cutting modes

Зажимной патрон	Обозначение патрона	f_z , мм/зуб	a_e , мм	a_p^* , мм	n^{**} , мин ⁻¹
Гидропластовый (Shunk 204055)	1	0,1	16	3	23297
Силовой (Showa HSKA63-HPC16S-110)	2			3,8	23297
Гидропластовый (CoroChuck 930-NA06-HD20-104)	3			3	21412
Термозажимной (Haimer A63.140.16)	4			5,6	21412
				3	22326
				4,4	22326
				3	24789
				4	24789

* a_p – глубина резания;

** n – вращение шпинделя.

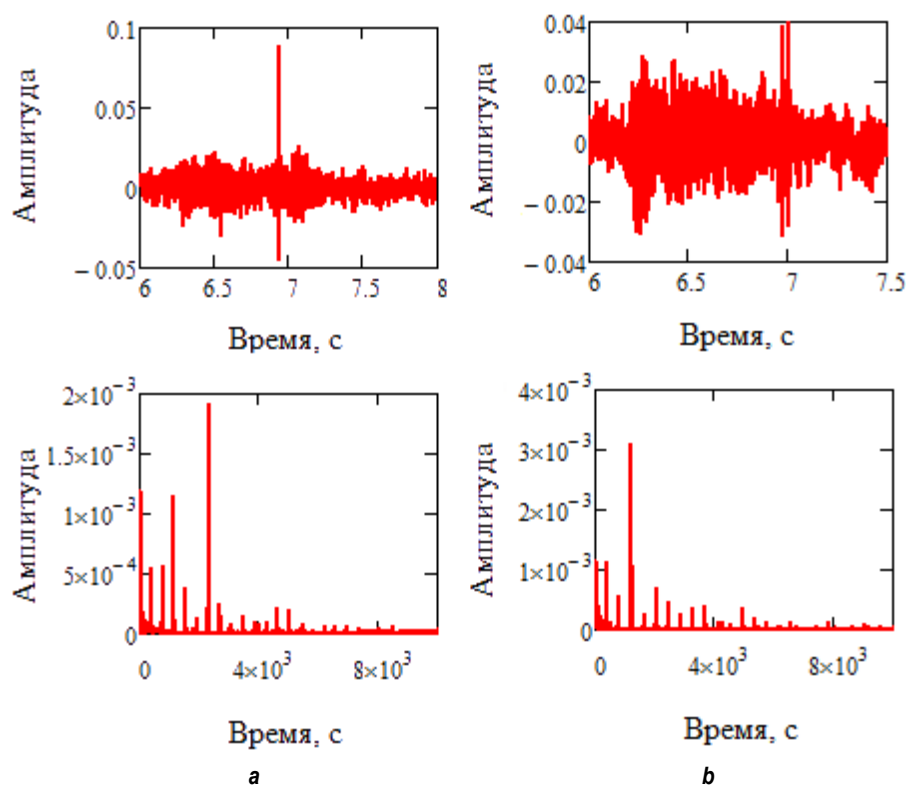


Рис. 4. Результаты измерения вибраций при фрезеровании инструментальными наладками на базе зажимного патрона: а – Shunk 204055; б – Haimer A63.140.16
 Fig. 4. Results of measuring vibrations when milling with tooling setups based on a clamping chuck: а – Shunk 204055; б – Haimer A63.140.16

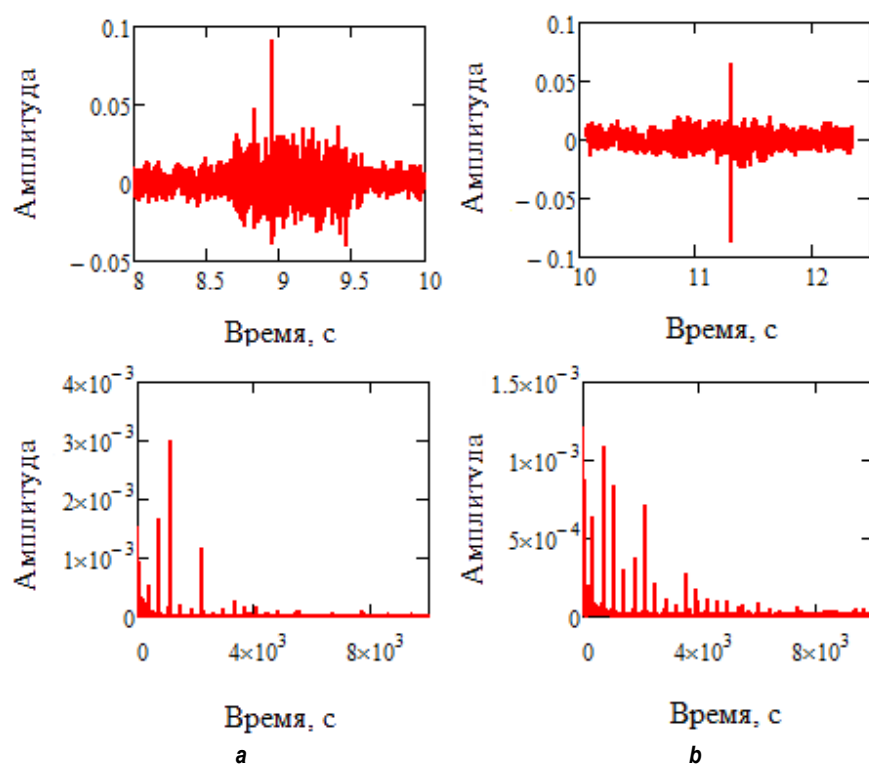


Рис. 5. Результаты измерения вибраций при фрезеровании инструментальными наладками на базе зажимного патрона: а – CoroChuck 930-HA06-HD20-104; б – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA
 Fig. 5. Results of measuring vibrations when milling with tooling setups based on a clamping chuck: а – CoroChuck 930-HA06-HD20-104; б – Showa HSKA63-HPC16S-110 AA

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки влияния зажимного патрона на процесс резания обработка выполнялась в два этапа. Первый – с глубиной резания a_p равной 3 мм, являющейся допустимой для каждой рассматриваемой инструментальной наладки. Второй – с максимально допустимой глубиной, в соответствии с диаграммой устойчивости. В процессе обработки выполнялся контроль вибраций с помощью микрофона Shure PGA81-XLR. Временной и частотный сигналы приведены на рис. 4, 5.

Представленные на рис. 4, 5 графики позволяют говорить об отсутствии вибраций при фрезеровании независимо от типа зажимного патрона при условии назначения режимов резания на основании диаграммы устойчивого резания.

После фрезерования была измерена шероховатость обработанной поверхности (табл. 3) и построены графики зависимости

параметра шероховатости R_a от типа используемого патрона (рис. 6). Также был произведен расчет производительности операции фрезерования, определяемый скоростью съема материала – Q (см. табл. 3).

По результатам измерения шероховатости можно сделать вывод, что на качество обработанной поверхности зажимной патрон оказывает значительное влияние. Величина параметра шероховатости R_a обработанной поверхности на 60–70% меньше при фрезеровании инструментальной наладкой на базе силового патрона, чем при фрезеровании инструментальной наладкой на базе гидропластового или термозажимного патрона.

Что касается производительности операции фрезерования, то при работе инструментальной наладкой на базе силового патрона она выше в 1,27–1,47 раза, чем для остальных рассматриваемых в данной работе наладок (рис. 7).

Таблица 3. Результаты измерения шероховатости

Table 3. Roughness measurement results

Зажимной патрон	Обозначение патрона	f_z , мм/зуб	a_e , мм	a_p , мм	n , мин ⁻¹	R_a , мкм	Q , см ³ /мин
Гидропластовый (Shunk 204055)	1	0,1	16	3	23297	0,92	335,5
Силовой (Showa HSKA63-НРС16S-110)	2			3,8	23297	0,98	424,9
				3	21412	0,56	308,3
Гидропластовый (CoroChuck 930-NA06-HD20-104)	3			5,6	21412	1,42	575,6
				3	22326	1,64	321,5
Термозажимной (Haimer A63.140.16)	4			4,4	22326	0,97	471,5
				3	24789	0,98	357,0
		4	24789	1,79	475,9		

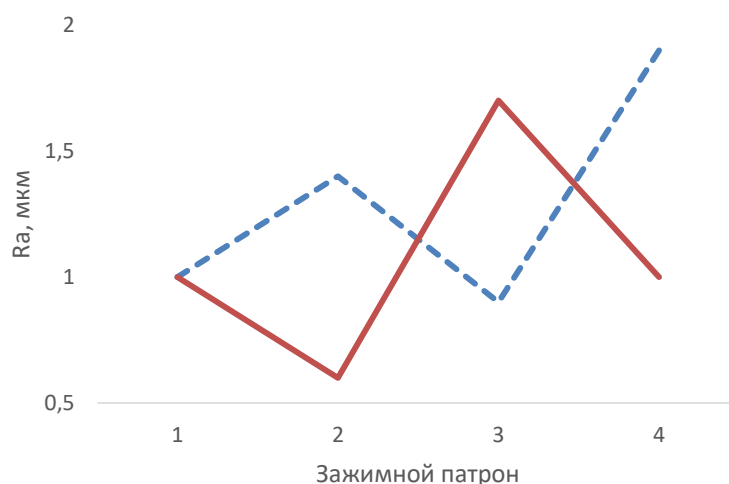


Рис. 6. График зависимости параметра шероховатости R_a
Fig. 6. Dependence diagram of the roughness parameter R_a

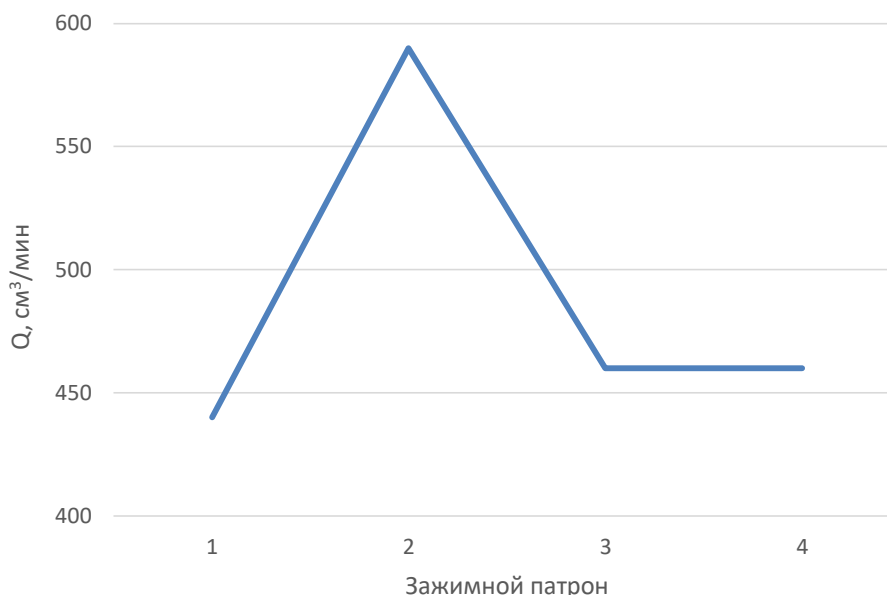


Рис. 7. График зависимости скорости съема материала Q
Fig. 7. Dependence diagram of the material removal rate Q

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о влиянии зажимных патронов на устойчивость процесса фрезерования и качество обработанной поверхности. Наибольшая скорость съема материала и минимальная шероховатость поверхности достигаются при фрезеровании инструментальной наладки на базе силового патрона.

Диаграмма динамической устойчивости, построенная на основании результатов экспериментального модального анализа, позволяет учесть модальные параметры инструментальной наладки, в том числе и зажимного патрона. Результаты исследования могут быть использованы при выборе инструментальной оснастки для станков с числовым программным управлением.

Список источников

1. Абдурахманов А. У., Джемилов Э. Ш. Анализ причин возникновения автоколебаний при механической обработке резанием // Таврический научный обозреватель. 2016. № 5-1. С. 252–257.
2. Siddhpura M., Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning // Manufacture. 2012. Vol. 61. P. 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>.
3. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes: a review // Elsevier International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. Iss. 5. P. 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.
4. Altintas Yu. Manufacturing automation metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design: 2nd edition. Vancouver: Cambridge University Press, 2012. 381 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843723>.
5. Copenhaver R., Schmitz T. Modeling and simulation of modulated tool path (MTP) turning stability // Manufacturing Letters. 2020. Vol. 24. P. 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.03.013>.
6. Yang Kai, Wang Guofeng, Dong Yi, Zhang Quanbiao, Sang Lingling. Early chatter identification based on an optimized variational mode decomposition // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 115. P. 238–254. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.052>.
7. Budak E., Tunç L. T., Alan S., Özgüven H. N. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling // CIRP Annals. 2012. Vol. 61. Iss. 1. P. 339–342. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.144>.
8. Lu Kaibo, Gu Fengshou, Longstaff A., Li Guoyan. An investigation into tool dynamics adaptation for chatter stability enhancement in the turning of flexible workpieces // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume. 2020. Vol. 111. No. 11-12. P. 3259–3271. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06339-x>.
9. Соколов Г. В., Гузев Д. А., Жидяев А. Н. Усовершенствованный полnodискретный метод анализа виброустойчивости процесса обработки концевыми фрезами с переходным радиусом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 3. С. 34–40.
10. Свинин В. М. Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения реге-неративных автоколебаний // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2006. № 41. С. 135–142.
11. Свинин В. М. Исследование условий возбуждения

и гашения регенеративных автоколебаний в процессе резания // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2005. № 1. С. 29–31.

12. Лановой Д. А., Свинин В. М., Савилов А. В. Подавление автоколебаний при концевом фрезеровании на станке с ЧПУ методом программной модуляции скорости резания // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2018. № IV-I. С. 79–90.

13. Внуков Ю. Н., Натальчишин В. В., Гермашев А. И., Кучугуров М. В., Дядя С. И. Применение модуляции скорости главного движения фрезерного станка для гашения регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенных деталей // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. 2014. № 3(72). С. 12–17. <https://doi.org/10.20535/23059001.2014.72.32912>.

14. Liu Changfu, Zhu Lida, Ni Chenbing. The chatter identification in end milling based on combining EMD and WPD // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 91. No. 3-11. P. 3339–3348. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0024-8>.

15. Bediaga I., Egaña I., Munoa J., Zatarain M., López De Lacalle L.N. Chatter avoidance method for milling process based on sinusoidal spindle speed variation method: simulation and experimental results // 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations (Reggio Calabria, August 2007). Reggio Calabria, 2007.

16. Bediaga I., Hernandez J., Munoa J., Uribe-Etxeberria R. Comparative analysis of spindle speed variation tech-

niques in milling // Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Reconstruction and Development: 15th International DAAAM Symposium (Vienna, November 2004). Vienna, 2004. P. 1–2.

17. Yuan Heng, Wan Min, Yang Yun, Zhang Wei-Hong. A tunable passive damper for suppressing chatters in thin-wall milling by considering the varying modal parameters of the workpiece // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 104. P. 4605–4616. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04316-7>.

18. Altıntaş Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling // CIRP Annals. 1995. Vol. 44. Iss. 1. P. 357–362. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62342-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62342-7).

19. Yan Rong, Gong Yanhong, Peng Fangyu, Tang Xiaowei, Li Hua, Li Bin. Three degrees of freedom stability analysis in the milling with bull-nosed end mills // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 86. P. 71–85. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8144-5>.

20. Воронов С. А., Непочатов А. В., Киселев И. А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 1. С. 50–62. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-1-50-62>.

21. Свинин В. М., Савилов А. В., Шутенков А. В., Панин М. А. Подавление автоколебаний при токарной обработке программной модуляцией скорости резания системы числового программного управления станка // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12. С. 115–124. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-115-124>.

References

1. Abdurahmanov A. U., Dzhemilov E. Sh. Analysis of the causes of self-oscillations occurrence under by cutting. *Tavrisheskij nauchnyj obozrevatel*. 2016;5-1:252–257. (In Russ.).

2. Siddhpura M., Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning. *Manu-facture*. 2012;61:27–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.0073>.

3. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes: a review. *Elsevier International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51(5):363–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.

4. Altintas Yu. *Manufacturing automation metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Vancouver: Cambridge University Press; 2012, 381 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511843723>

5. Copenhaver R., Schmitz T. Modeling and simulation of modulated tool path (MTP) turning stability. *Manufacturing Letters*. 2020;24:67–71. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.03.013>.

6. Yang Kai, Wang Guofeng, Dong Yi, Zhang Quانبiao, Sang Lingling. Early chatter identification based on an optimized variational mode decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019;115:238–254. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.052>

7. Budak E., Tunç L. T., Alan S., Özgüven H. N. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling. *CIRP Annals*. 2012;61(1):339–342. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.144>

8. Lu Kaibo, Gu Fengshou, Longstaff A, Li Guoyan. An investigation into tool dynamics adaptation for chatter stability enhancement in the turning of flexible workpieces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume*. 2020;111(11-12):3259–3271. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06339-x>.

9. Sokolov G. V., Guzev D. A., Zhidyaev A. N. Modified full-discretization method of bull-nosed end milling process stability analysis. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;21(3):34–40. (In Russ.).

10. Svinin V. M. Selection of cutting speed modulation parameters for damping of regenerative self-oscillations. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2006;41:135–142. (In Russ.).

11. Svinin V. M. Research of the regenerative self-oscillation excitation and damping conditions in the process of cutting. *Obrabotka Metallov = Metal Working and Material Science*. 2005;1:29–31. (In Russ.).

12. Lanovoy D. A., Svinin V. M., Savilov A. V. Self-oscillation suppression by the cutting speed variation method when end milling on the CNC machine tool. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure*

State Technical University. Series: Mechanical engineering. 2018; № IV-I:79-90. (In Russ.).

13. Vnukov Y., Natal'chishin V., Germashev A., Kuchugurov M., Djadja S. Suppression of self-excited vibration at milling of thin-walled details by modulation of speed of the main motion of the milling machine. *Visnik nacional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiivs'kij politekhnichnij institut". Seriya: Mashinobuduvannya = Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2014;3(72):12-17. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2014.72.32912>.

14. Liu Changfu, Zhu Lida, Ni Chenbing. The chatter identification in end milling based on combining EMD and WPD. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;91(3-11):3339-3348. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0024-8>.

15. Bediaga I., Egaña I., Munoa J., Zatarain M., López De Lacalle L. N. Chatter avoidance method for milling process based on sinusoidal spindle speed variation method: simulation and experimental results. In: *10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*. August 2007, Reggio Calabria. Reggio Calabria; 2007.

16. Bediaga I., Hernandez J., Munoa J., Uribe-Etxeberria R. Comparative analysis of spindle speed variation techniques in milling. In: *Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Reconstruction and Development: 15th International DAAAM Symposium*. November 2004, Vienna.

na. Vienna; 2004, p. 1-2.

17. Yuan Heng, Wan Min, Yang Yun, Zhang Wei-Hong. A tunable passive damper for suppressing chatters in thin-wall milling by considering the varying modal parameters of the workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;104:4605-4616. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04316-7>.

18. Altıntaş Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals*. 1995;44(1):357-362. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62342-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62342-7).

19. Yan Rong, Gong Yanhong, Peng Fangyu, Tang Xiaowei, Li Hua, Li Bin. Three degrees of freedom stability analysis in the milling with bull-nosed end mills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;86:71-85. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8144-5>.

20. Voronov S. A., Nepochatov A. V., Kiselev I. A. Assessment criteria of non-rigid part milling stability. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2011;1:50-62. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-1-50-62>.

21. Svinin V. M., Savilov A. V., Shutenkov A. V., Panin M. A. Damping of self-oscillations at lathe turning by software modulation of CNC machine-tool cutting speed. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(12):115-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-115-124>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Шапарев Петр Петрович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.07.2021; одобрена после рецензирования 28.09.2021; принята к публикации 22.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Petr P. Shaparev,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 06.07.2021; approved after reviewing 28.09.2021; accepted for publication 22.10.2021.



Научная статья

УДК 621.9.048.4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-559-567>

Влияние орбитального движения электрода на точность электроэрозионной обработки

Петр Владимирович Татанов¹, Андрей Романович Янюшкин²,
Дмитрий Александрович Шнайдер³, Александр Сергеевич Янюшкин^{4✉}

^{1,2,3,4} Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

¹ tatanov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9919-6194>

² andreyayushkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>

³ dmitrij.schneider@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2426-3839>

⁴ yanyushkinas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>

Аннотация. Цель – изучение процессов, возникающих при электроэрозионной обработке инструментальных сталей, влияние орбитальных движений электрода на точность обработки, а также обоснование применения индивидуальных траекторий орбит и внедрение этих данных в производство. Для написания программы траектории в машинных кодах на станок Mitsubishi EA-28 использовался программный комплекс CIMCO EDIT. Выполнялись опытное изготовление и замеры пуансона и толкателя вырубного штампа. Обработка производилась на электроэрозионном прошивном станке Mitsubishi EA-28. Прожиг осуществлялся в среде диэлектрика Blasospark GT 250. Обработка совершалась до шероховатости Ra0.6 за 9 проходов с применением стандартного пакета режимов обработки. В ходе проведенных опытных работ было выявлено влияние геометрии электрода на обработку острых углов: формирование на обрабатываемой детали «паразитных радиусов». Установлено, что при засверливании углов отверстиями с малым диаметром (0,4–0,6 мм) данное явление исчезает. Также замечен эффект инверсии движения электрода в зависимости от обкатки по внутреннему или внешнему краю траектории. Осуществлена обработка производственной детали (пуансон вырубного штампа). Во время обработки использовалась новая орбита, адаптированная геометрии изделия. Установлено, что деталь является отвечающей требованиям и соответствует конструкторскому чертежу. Штамп собран и передан в основное производство. По результатам проведенных испытаний, изучения отечественного и зарубежного опыта выработаны рекомендации по применению индивидуальных орбит при электроэрозионной обработке инструментальных сталей, твердых сплавов и других труднообрабатываемых токопроводящих материалов. Метод орбитальных движений по специальной траектории был внедрен на АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» (г. Чебоксары).

Ключевые слова: мультиосевая обработка, электроэрозия, проволоочная вырезка, электроды, орбитальное движение электрода, индивидуальная орбита

Для цитирования: Татанов П. В., Янюшкин А. Р., Шнайдер Д. А., Янюшкин А. С. Влияние орбитального движения электрода на точность электроэрозионной обработки // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 559–567. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-559-567>.

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

Impact of orbiting electrode motion on the accuracy of electrical discharge machining

Petr V. Tatanov¹, Andrey R. Yanushkin², Dmitriy A. Schneider³, Alexander S. Yanyushkin^{4✉}

^{1,2,3,4} I. N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

¹ tatanov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9919-6194>

² andreyayushkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>

³ dmitrij.schneider@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2426-3839>

⁴ yanyushkinas@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>

Abstract. The present study is designed to study processes occurring during the electrical discharge machining (EDM) of tool steels, the influence of orbiting electrode motion on its accuracy, as well as to justify the application of individual orbiting trajectories and implement these data into production. To that end, a trajectory program was written in machine codes for a Mitsubishi EA-28 die-sinking electrical discharge machine using the CIMCO EDIT software package. Also, a prototype punch and ejector of the blanking die were produced and measured. The standard modes of Mitsubishi EA-28 were used to carry out machining in Blasospark GT 250 dielectric fluid to a roughness of Ra 0.6 in 9 passes. The experiments revealed the influence of electrode geometry on the machining of sharp corners, i.e., the formation of unwanted radii on the workpiece. However, this phenomenon is not observed when the corners are drilled with small diameter holes (0.4–0.6 mm). Depending on the machining process along the inner or outer trajectory, inverse electrode motion is also observed. The production part (punch of the blanking die) was machined using a new orbit adjusted to the geometry of the product. The part was found to be consistent with the requirements and the engineering drawing, thus allowing the assembled die to enter the main production. The results of the performed tests, as well as the study of domestic and foreign experience, were used to develop recommendations on the use of individual orbits in the EDM of tool steels, hard alloys, and other hard-to-machine conductive materials. The method of orbiting motion along a particular trajectory was implemented at Cheboksary Electrical Apparatus Plant (Cheboksary).

Keywords: multi-axis machining, electroerosion (electrical discharge machining), wire cutting, electrodes, electrode orbital motion, individual orbit

For citation: Tatanov P. V., Yanyushkin A. R., Schneider D. A., Yanyushkin A. S. Impact of orbiting electrode motion on the accuracy of electrical discharge machining. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):559-567. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-559-567>.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдая за развитием науки и техники, нельзя не заметить существенной разницы перехода от грубой технологии обработки деталей до высокотехнологичной, инновационной, высокоточной. Аналогичная ситуация была и с процессом электроэрозионной обработки (ЭЭО). Поначалу ЭЭО использовалась в подготовительных операциях как способ удаления излишнего припуска, для последующих чистовых операций, а также извлечения сломанных режущих инструментов. Повышение точности происходило за счет изменения элементов процесса обработки. Это отразилось на эволюции генераторов тока, механизмах приводов и траектории перемещения электрода. Появление орбитальных движений в ЭЭО значительно повысило качество и точность обработки. Изучение влияния орбитального движения ведется как иностранными [1–3], так и отечественными исследователями [4–8].

Орбитальные движения электрода (разбивка) необходимы во время электроэрозионной обработки для обеспечения точности размера и необходимой шероховатости. Существенное значение при этом имеет движение электрода относительно заданной координаты по специальной траектории (рис. 1).

Так как электроэрозионный процесс представляет собой поток электрических разрядов между электродом и обрабатываемой деталью, то электроды представляют собой поверхности, расположенные от детали на расстоянии электрического зазора. Физика процесса ЭЭО изображена на (рис. 2)⁵.

На сегодняшний день не существует конкретной методики, описывающей орбитальное движение при эрозионной обработке металла. Для этого сложного процесса обработки не существует даже единой убедительной теории. Однако эмпирические данные свидетельствуют об эффективных процессах, которые происходят во время электроэрозионной обработки. Поэтому целью настоящей работы является влияние орбитальных движений на точность обработки, возникающих при электроэрозионной обработке; обоснование применения индивидуальных траекторий орбит.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В нашем случае последовательность орбитальных движений изображена на рис. 3. Чем выше точность обработки, тем больше проходов осуществляет электрод. На старых станках (рис. 4) с механической логикой или однокоординатных станках ZNC (от англ. Z-

⁵Левинсон Е. М., Лев В. С. Электроэрозионная обработка металлов: справ. пособ. по электротехнологии. Л.: Лениздат, 1972. 328 с.

numerical control – числовое управление осью Z) орбитальных движений не было, и приходилось использовать несколько видов электродов (черновые и чистовые), которые имели разные электрические зазоры. Это значительно усложняло технологический процесс. Опытные эрозионисты вручную совершали «разбивку поверхностей». Для создания орбитальных движений в качестве модернизации оборудования многими производителями были выпущены накладные приспособления для реализации орбитальных движений механическим (с помощью эксцентрика) или электромеханическим (с применением сервопривода) способом. Данные накладки значительно сокращали рабочую зону по высоте обработки. На рис. 5 изображена программируемая блоком управления сервоприводов

(рис. 6) приставка для орбитальной разбивки станка FORM 2-LC ZNC.

Процесс ЭЗО представляет собой серию последовательных проходов, при которых с каждым переходом энергия искры уменьшается, а вместе с ним уменьшается и электрический зазор. Уменьшение зазора, соответственно, компенсируется орбитальным движением.

В результате электрод, двигаясь по орбите (ощупывая деталь), удаляет лишний материал. Сенсором электрода является электрическая обратная связь в виде напряжения пробоя, величина которого пропорциональна зазору. На чистовом проходе зазор составляет 0,02 мм, при начальном зазоре – 0,15–0,2 мм. Черновой зазор может достигать величин до 1,5 мм.

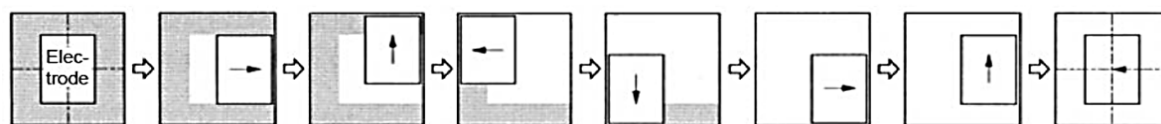


Рис. 1. Перемещение электрода по квадратной орбите

Fig. 1. Electrode moves in a square orbit

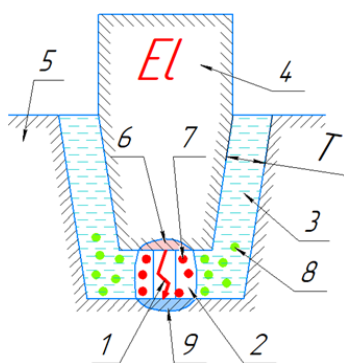


Рис. 2. Схема электроэрозионной обработки: 1 – канал разряда – электрический разряд; 2 – газовый пузырь; 3 – рабочая жидкость; 4 – электрод; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – зона износа электрода; 7 – расплавленные частицы; 8 – застывшие частицы (отход); 9 – зона обработки детали; T – электрический зазор

Fig. 2. Diagram of electrical discharge machining: 1 – discharge channel – electric discharge; 2 – gas bubble; 3 – working fluid; 4 – electrode; 5 – part being machined; 6 – electrode wear zone; 7 – molten particles; 8 – solidified particles (waste); 9 – part processing zone; T – electrical gap

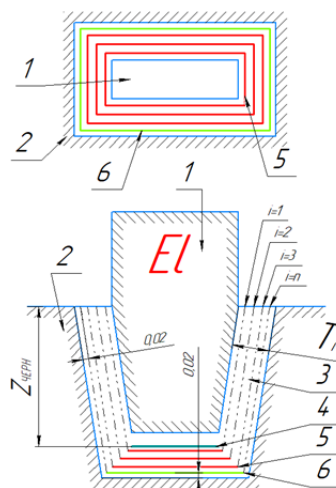


Рис. 3. Последовательность переходов электроэрозионной обработки прожига: 1 – электрод; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – рабочая жидкость; 4 – электроэрозионная обработка (черновая) без орбитального движения на глубину $Z_{\text{ЧЕРН}}$; 5 – промежуточные орбиты; 6 – чистовая орбита; T_i – электрический зазор; n – количество орбитальных движений

Fig. 3. Sequence of transitions for burn electrical discharge machining: 1 – electrode; 2 – part being machined; 3 – working fluid; 4 – electrical discharge machining (roughing) without orbital motion in depth of $Z_{\text{ЧЕРН}}$; 5 – transfer orbits; 6 – finishing orbit; T_i – electrical gap; n – number of orbital motions



Рис. 4. Станок ZNC
 Fig. 4. ZNC machine tool



Рис. 5. Приспособление для орбитального перемещения
 Fig. 5. Device for orbital motion



Рис. 6. Блок управления сервоприводами приспособления
 Fig. 6. Control unit of device's servo drives

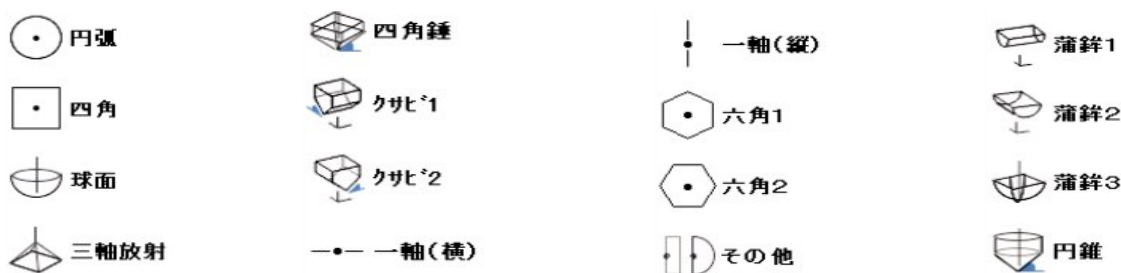


Рис. 7. Стандартные орбитальные движения на примере станка Mitsubishi EA-28
 Fig. 7. Standard orbital motions on example of the Mitsubishi EA-28 machine tool

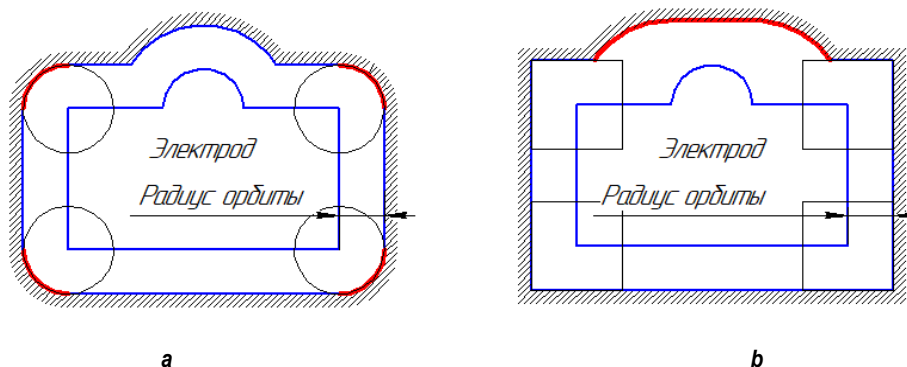


Рис. 8. Пример искажения профиля за счет орбитальных движений (красным цветом изображены искаженные поверхности): а – круговая орбита; б – квадратная орбита
 Fig. 8. Example of profile distortion due to orbital motions (distorted surfaces are marked in red): а – circular orbit; б – square orbit

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Чаще всего траектории движения сервоприводов «вшиты» в память оборудования и представляют собой стандартный набор (рис. 7). Не всегда этих движений достаточно. Встречаются ситуации, когда, наоборот,

искаженно применяемая траектория может повредить (испортить) деталь или сформировать не соответствующую стандарту поверхность (рис. 8). В связи с этим появляется необходимость создания индивидуальной траектории орбитального движения электрода. Например, при изготовлении пуансона

вырубного штампа (рис. 9) возникла проблема отсутствия стандартной орбиты ЭЗО для обработки треугольного контура.

Обработка режущим инструментом также невозможна по причине малых размеров детали и высокой твердости. По стандартной технологии был разработан специальный электрод (рис. 10) и произведена обработка детали по заданной орбите (рис. 11).

На первый взгляд казалось, что все идет технологически верно. Однако замеры детали показали, что деталь бракована, а на углах треугольника были видны радиусы. Деталь оказалась непригодной для использования (рис. 12). Более внимательный анализ показал, что скругление углов связано с радиусом проволоки, которой вырезался электрод. Для исключения данного эффекта применили освобождение углов (рис. 13). Брак детали, безусловно, был связан с инверсией траектории движения. Как оказалось, электрод-матрица движется в отличие от электродов

пуансонов по инвертированной траектории. Орбита требовала корректировки. Программа корректировки показана на рис. 14.

Повторная обработка оказалась успешной. Размеры и геометрия детали оказались в допуске. Время обработки составило 43 мин. Работа производилась на станке Mitsubishi EA-28 (рис. 15). За счет гибкого изменения орбитального радиуса легко достигаются заданные размеры детали, обеспечивается эффективное удаление отхода, а электрический разряд, равномерно генерирующийся во всех направлениях, позволил достичь шероховатости обработанной поверхности до $Ra\ 0,4\ \mu\text{m}$. Также существенно уменьшился износ углов (рис. 16), а количество используемых электродов снизилось. Данная усовершенствованная технология успешно внедрена в производство на АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» в г. Чебоксары.

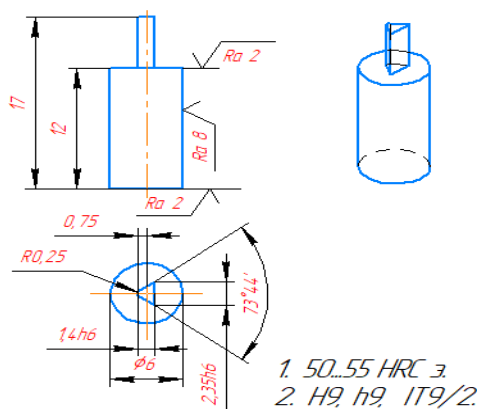


Рис. 9. Пуансон
Fig. 9. Punch

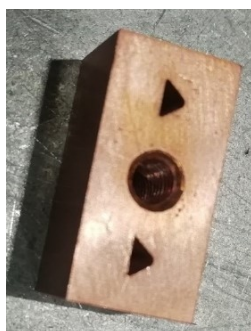


Рис. 10. Электрод
Fig. 10. Electrode

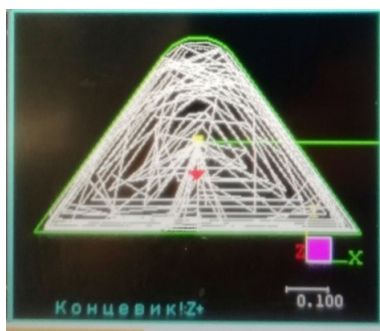


Рис. 11. Орбита и электроэрозионная обработка
Fig. 11. Orbit and electrical discharge machining

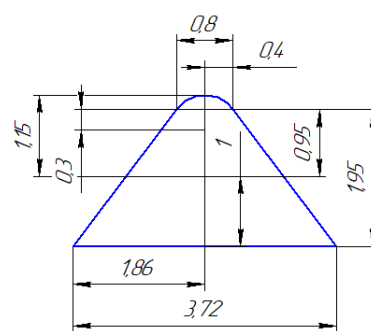
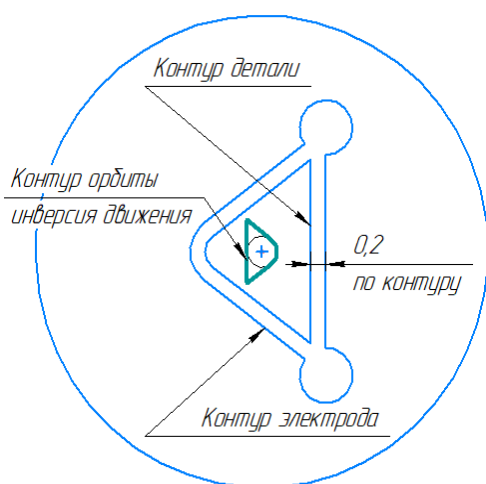
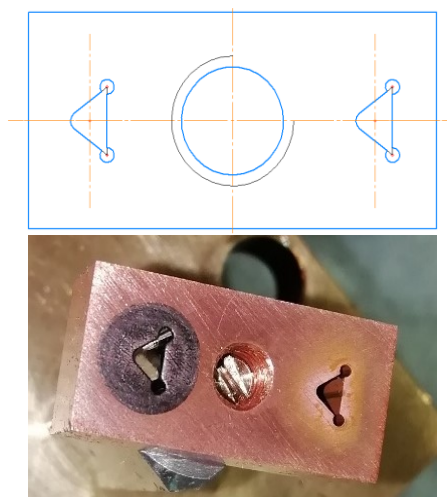




Рис. 12. «Испорченная» деталь
 Fig. 12. Spoiled part



Рис. 13. Электрод с коррективной геометрией
 Fig. 13. Electrode with corrected geometry



N266(Treugolnik)
 G17
 G91G1X0Y0
 G1X-1.
 Y2.
 X1.6Y-1.2
 G2X-0Y-1.6I-0.6J-0.8
 G1X-1.6Y-1.2
 Y2.
 X1.
 G23

Рис. 14. Скорректированная орбита и программа орбитального движения
 Fig. 14. Corrected orbit and the program of orbital motion



Рис. 15. Готовый пуансон
 Fig. 15. Finished punch

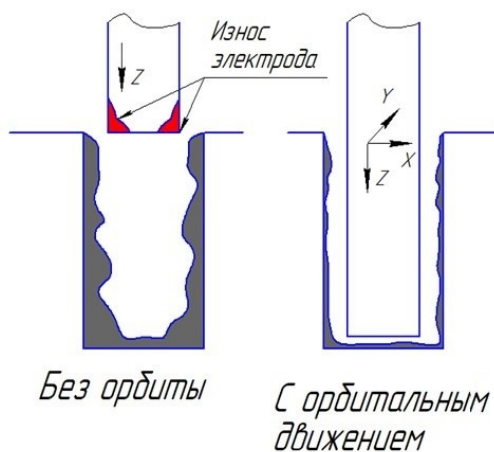


Рис. 16. Износ электрода
 Fig. 16. Electrode wear

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе представленного материала можно выделить следующие достоинства при использовании индивидуальных орбитальных движений:

– правильное использование орбит позволяет с высокой точностью исключить погрешности формы и снизить шероховатость

обработанной поверхности;

– индивидуальные орбиты позволяют точно обрабатывать не только в Z-координатах, но и в мультиосевом направлении. Это, в свою очередь, расширяет возможности автоматизации технологических процессов [2, 9–21].

Список источников

1. Wang Gang, Shan Yan. Compensation of electrode orbiting in electrical discharge machining based on non-uniform offsetting // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. Vol. 45. Iss. 14. P. 1628–1634. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.023>.
2. Sadollah Bamerni Z., El-Hofy H. Orbital electrochemical machining of electrode discharge machined surfaces // AMST'02 Advanced Manufacturing Systems and Technology. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures) / eds. E. Kulianic. Vol. 437. Vienna: Springer, 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2555-7_51.
3. Hai Peng Huang, Guan Xin Chi, Zhen Long Wang. Multi-axis EDM CNC system based on RT-Linux // Key Engineering Materials / eds. Daizhong Su, Qingbin Zhang, Shifan Zhu. Vol. 419–420. Trans Tech Publications Ltd, 2009. P. 809–812. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.809>.
4. Ибрагимова Л. И., Еникеев Б. А., Акмаев О. К. Кинематический анализ электроэрозионного 5 осевого станка с параллельной кинематикой // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста 2018.: матер. Всерос. науч.-техн. конф. (г. Уфа, 28 февраля – 1 марта 2018 г.). Уфа: Изд-во УГАТУ, 2018. С. 315–321.
5. Кратюк Н. А. Определение оптимального метода получения глубоких отверстий малого диаметра в деталях ГТД и его экспериментальное исследование // Известия Московского государственного машиностроительного университета «МАМИ». 2014. Т. 2. № 4. С. 20–26.
6. Сариллов М. Ю. Исследование процессов электроэрозионной обработки // Наука и образование. 2016. № 3. С. 76–82.
7. Смоленцев В. П., Коптев И. Т., Газизуллин К. М. Технологические возможности и перспективы развития электроэрозионной и электрохимической размерной обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-2. С. 49–56.
8. Chen Jiang Hua, Bernaerts D., Seo Jin Won, Van Tendeloo G., Kagi H. Voidites in polycrystalline natural diamond // Philosophical Magazine Letters. 1998. Vol. 77. Iss. 3. P. 135–140. <https://doi.org/10.1080/095008398178561>.
9. Михалёв О. Н., Янюшкин А. С., Попов А. Ю. Современный подход к автоматизации технологической подготовки производства // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 4. С. 39–43.
10. Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Рычков Д. А. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях // Ползуновский альманах. 2008. № 4. С. 214–216.
11. Татанов П. В., Янюшкин А. Р., Шнайдер Д. А., Янюшкин А. С. Опыт электроэрозионного фрезерования на АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» // Актуальные проблемы в машиностроении. 2021. Т. 8. № 3-4. С. 57–62.
12. Янюшкин А. Р., Лобанов Д. В., Татанов П. В. Совершенствование процесса электроалмазного шлифования // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Пермь, 14–15 декабря 2020 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. С. 144–148.
13. Татанов П. В., Янюшкин А. Р., Шеров К. Т., Янюшкин А. С. Использование вторичного ресурса твердосплавных сменных многогранных пластин в металлообработке // Наука и техника Казахстана. 2021. № 1. С. 85–96.
14. Янюшкин А. С., Баранов А. Н., Лосев А. Б., Якимов С. А. Исследование возможности замены электролитов при электроалмазной обработке на обычные смазочно-охлаждающие технические среды // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2007. Т. 1. № 2. С. 25–30.
15. Янюшкин А. С., Рычков Д. А., Лобанов Д. В., Петров Н. П. Методика формирования базы данных режущих инструментов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 143–146.
16. Popov V. Yu., Yanyushkin A. S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 91–102.
17. Skeebe V. Yu., Ivancivsky V. V., Kutyshev A. V., Parts K. A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 126. P. 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012016>.
18. Zamashchikov Y. I. Duality in metal cutting: impact to the surface layer residual stress // Materials and Manufacturing Processes. 2006. Vol. 21. Iss. 5. P. 551–566.

<https://doi.org/10.1080/10426910500471706>.

19. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment // *Materials and Manufacturing Processes*. 2015. Vol. 30. Iss. 12. P. 1408–1411.

<https://doi.org/10.1080/10426914.2014.973595>.

20. Rowe W. B. Principles of modern grinding technology.

2nd ed. Oxford: Elsevier, 2014. 480 p.

21. Kim C. S., Massa T. R., Rohrer G. S. Modeling the relationship between microstructural features and the strength of WC–Co composites // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2006. Vol. 24. Iss. 1-2. P. 89–100. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2005.04.011>.

References

1. Wang Gang, Shan Yan. Compensation of electrode orbiting in electrical discharge machining based on non-uniform offsetting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. Iss. 14. P. 1628–1634. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.023>.

2. Sadollah Bamerni Z., El-Hofy H. Orbital electrochemical machining of electrodischarge machined surfaces. In: Kulianic E. (eds.). *AMST'02 Advanced Manufacturing Systems and Technology. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures)*. Vol. 437. Vienna: Springer; 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2555-7_51.

3. Hai Peng Huang, Guan Xin Chi, Zhen Long Wang. Multi-axis EDM CNC system based on RT-Linux. In: Su Daizhong, Zhang Qingbin, Zhu Shifan (eds.). *Key Engineering Materials*. Vol. 419–420. Trans Tech Publications Ltd; 2009, p. 809–812. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.809>.

4. Ibragimova L. I., Yenikeev B. A., Akmaev O. K. Kinematic analysis of an electroerosion 5-axis machine tool with parallel kinematics. In: *Stankostroyeniye i innovatsionnoye mashinostroyeniye. Problemy i tochki rosta: materialy Vserossiyskoy nauchnotekhnicheskoy konferencii = Machine-Tool Building and Innovative Mechanical Engineering. Problems and Points of Growth 2018: materials of All-Russian scientific and technical conference*. 28 February – 1 March, 2018, Ufa. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2018, p. 315–321. (In Russ.).

5. Kratyuk N. A. Determination of optimal method of making of small diameter deep holes in parts of gas-turbine engine and its experimental study. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo mashinostroyitel'nogo universiteta «MAMI» = Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2014;2(4):20–26. (In Russ.).

6. Sarilov M. Yu. The study of electrical discharge machining process. *Nauka i obrazovanie*. 2016;3:76–82. (In Russ.).

7. Smolentsev V. P., Koptev I. T., Gazizullin K. M. Technological possibilities and development prospect of electroerosion and electrochemical dimensional machining. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2012;2-2:49–56. (In Russ.).

8. Chen Jiang Hua, Bernaerts D., Seo Jin Won, Van Tendeloo G., Kagi H. Voidites in polycrystalline natural diamond. *Philosophical Magazine Letters*. 1998;77(3):135–140. <https://doi.org/10.1080/095008398178561>.

9. Mikhalev O. N., Yanyushkin A. S., Popov A.Yu. Contemporary approach to technological preparation automation of the production. *Avtomatizatsiya i sovremennye*

tehnologii. 2011;4:39–43. (In Russ.).

10. Yanyushkin A. S., Lobanov D. V., Rychkov D. A. Software products to automate preparation of tool production at enterprises. *Polzunovskiy al'manah*. 2008;4:214–216. (In Russ.).

11. Tatanov P. V., Yanyushkin A. R., Shnajder D. A., Yanyushkin A.S. Experience of electric erosion milling at JSC "Cheboksary Electrical Apparatus Plant". *Aktual'nye problemy v mashinostroyenii = Actual Problems in Machine Building*. 2021;8(3-4):57–62. (In Russ.).

12. Yanyushkin A. R., Lobanov D. V., Tatanov P. V. Improving the process of electro-diamond grinding. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoy promyshlennosti: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov = Electrophysical processing methods in modern industry: materials of IV International scientific and practical conference of young scientists, postgraduate students and students*. 14–15 December 2020, Perm'. Perm': Perm National Research Polytechnic University; 2021, p. 144–148. (In Russ.).

13. Tatanov P. V., Yanyushkin A. R., Sherov K. T., Yanyushkin A. S. Use of the secondary resource of hard-alloy replaceable multi-face plates in metalworking. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2021;1:85–96.

14. Yanyushkin A. S., Baranov A. N., Losev A. B., Yakimov S. A. Investigating possibility to replace electrolytes during electro-diamond treatment with conventional lubricating and cooling technical media. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2007;1(2):25–30.

15. Yanyushkin A. S., Rychkov D. A., Lobanov D. V., Petrov N. P. Methods of cutting tool database formation. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2013;1:143–146. (In Russ.).

16. Popov V. Yu., Yanyushkin A. S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels. *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*. 2012;4(1):91–102.

17. Skeebe V. Yu., Ivancivsky V. V., Kutyskin A. V., Parts K. A. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;126:012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012016>.

18. Zamashchikov Y. I. Duality in metal cutting: impact to the surface layer residual stress. *Materials and Manufacturing Processes*. 2006;21(5):551–566.

<https://doi.org/10.1080/10426910500471706>.
19. Skeeba V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015;30(12):1408-1411. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.973595>.
20. Rowe W. B. *Principles of modern grinding technology*.

2nd ed. Oxford: Elsevier; 2014. 480 p.
21. Kim C. S., Massa T. R., Rohrer G. S. Modeling the relationship between microstructural features and the strength of WC–Co composites. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2006;24(1-2):89-100. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2005.04.011>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Татанов Петр Владимирович,
аспирант,
Чувашский государственный университет
им. И. Н. Ульянова,
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

Янюшкин Андрей Романович,
магистрант,
Чувашский государственный университет
им. И. Н. Ульянова,
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

Шнайдер Дмитрий Александрович,
аспирант, инженер,
Чувашский государственный университет
им. И. Н. Ульянова,
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

Янюшкин Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология машиностроения»,
главный научный сотрудник,
Чувашский государственный университет
им. И. Н. Ульянова,
428015, г. Чебоксары, Московский просп., 15, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.08.2021; одобрена после рецензирования 07.09.2021; принята к публикации 25.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petr V. Tatanov,
Postgraduate Student,
I. N. Ulianov Chuvash State University,
15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russia

Andrey R. Yanushkin,
Master's Degree Student
I. N. Ulianov Chuvash State University,
15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russia

Dmitriy A. Schneider,
Postgraduate Student, Engineer,
I. N. Ulianov Chuvash State University,
15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russia

Alexander S. Yanyushkin,
Dr. Sci. (Eng.) Professor,
Professor of the Department of Machine-Building
Technology,
Chief Researcher,
I. N. Ulianov Chuvash State University,
15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 25.08.2021; approved after reviewing 07.09.2021; accepted for publication 25.10.2021.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.311:621.331

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-568-585>

Групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты для установок распределенной генерации

Юрий Николаевич Булатов✉

Братский государственный университет, г. Братск, Россия
bulatovyura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>

Аннотация. Цель – определение влияния предлагаемых групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты для установок распределенной генерации на показатели качества процесса управления в различных режимах работы системы электроснабжения. Использовались методы теории автоматического управления. Исследования проводились в среде MatLab с применением пакетов имитационного моделирования Simulink и SimPowerSystems. Предложен метод формирования и настройки групповых прогностических регуляторов на основе определения резонансной частоты колебаний ротора ведущего генератора. Указанный подход позволяет получить лучшие показатели качества управления напряжением и частотой в системе электроснабжения при сохранении прежних настроек регуляторов установок распределенной генерации. Установлено, что при подключении дополнительной нагрузки в изолированной системе электроснабжения в 1,75 раза снижается максимальный провал напряжения по сравнению с локальным прогностическим регулированием, а по сравнению с обычными регуляторами – в 3,5 раза. Для указанного режима использование прогностических регуляторов в 3 раза уменьшает время переходного процесса скорости вращения ротора синхронного генератора. В режиме пуска мощного электродвигателя (благодаря прогностическим регуляторам синхронных генераторов в системе электроснабжения) в 1,5 раза уменьшается провал напряжения, а после пуска в 1,4 раза снижается перенапряжение. При кратковременном трехфазном коротком замыкании по сравнению с локальным регулированием групповые прогностические регуляторы позволяют в 1,5 раза уменьшить время переходного процесса и в 2,3 раза величину перерегулирования для частоты в сети. При этом также уменьшается колебательность частоты в сети. Аналогичные эффекты наблюдаются и в других режимах работы рассматриваемых систем электроснабжения с установками распределенной генерации. Динамическое моделирование подтвердило эффективность использования групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты для установок распределенной генерации, заключающуюся в положительном влиянии на качество процессов управления параметрами системы электроснабжения в различных режимах работы.

Ключевые слова: установки распределенной генерации, газотурбинная установка, малая гидроэлектростанция, синхронные генераторы, автоматический регулятор скорости, автоматический регулятор возбуждения

Финансирование: Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZZS-2020-0039).

Для цитирования: Булатов Ю. Н. Групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты для установок распределенной генерации // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 568–585. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-568-585>.

POWER ENGINEERING

Original article

Joint voltage and frequency predictive controllers for distributed generation plants

Yuri N. Bulatov✉

*Bratsk State University, Bratsk, Russia**bulatovyura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>*

Abstract. The paper determines the effect of proposed joint voltage and frequency predictive controllers for distributed generation (DG) plants on quality indicators characterizing the control process in different operating modes of power supply systems. The studies are conducted in the MatLab environment (Simulink and SimPowerSystems simulation packages) employing control engineering methods. It is proposed to design and adjust joint predictive controllers by determining the resonant frequency of oscillations for the master generator rotor. This approach provides better quality indicators of voltage and frequency control in power supply systems while maintaining the same settings for the controllers of DG plants. With an additional load in an isolated power supply system, the maximum voltage sag is found to be 1.75 times lower than for local predictive control and 3.5 times lower as compared to the use of conventional controllers. For the specified mode, predictive controllers enable a threefold reduction in the transient time between rotor rotational speeds in a synchronous generator. In the start mode of a powerful electric motor, the predictive controllers of synchronous generators in the power supply system enable a 1.5 times reduction in voltage sag, with a 1.4 times reduction in overvoltage following its start. In the case of a short-term three phase short-circuit, joint predictive controllers allow a 1.5 times decrease in transient time and a 2.3 times decrease in the overshoot of power line frequency as compared to local control. In addition, frequency oscillation in the power system is also reduced. Similar effects are observed in other operating modes of the considered power supply systems equipped with DG plants. The performed dynamic simulation confirms the effectiveness of using joint voltage and frequency predictive controllers for DG plants, which consists in a positive impact on the quality of processes involved in controlling the parameters of power supply systems in various operating modes.

Keywords: distributed generation plants, gas turbine, small hydro power plant, synchronous generators, automatic speed regulator, automatic excitation regulator

Funding: The research was carried out with the financial support under a state assignment grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZZS-2020-0039).

For citation: Bulatov Yu. N. Joint voltage and frequency predictive controllers for distributed generation plants. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):568-585. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-568-585>.

ВВЕДЕНИЕ

В системах электроснабжения (СЭС) вблизи потребителей электроэнергии могут применяться установки распределенной генерации (РГ) [1–7], с помощью которых возможно снизить нагрузку питающей сети, уменьшить потери на передачу, а также повысить надежность электроснабжения и качество электроэнергии [8, 9].

В электроэнергетической системе (ЭЭС), где используется большое число установок РГ, может возникнуть проблема их централизованного регулирования и стабилизации частоты переменного тока. Различные типы установок РГ имеют свои локальные регуляторы, которые должны быть настроены должным образом. Таким образом, возникает достаточно сложная задача оптимизации настроек большого количества локальных регуляторов с учетом их взаимного влияния. Достаточно широкое распространение получили установки РГ, работающие на базе синхронных генераторов (СГ), для которых взаимосвязанными являются автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) и скорости (АРС) вращения ротора [10–12]. Кроме этого, при использовании в установке РГ, например, малой гидроэлектростанции (ГЭС), нескольких однотипных синхронных гидрогене-

раторов, требуется решать задачи оптимизации их загрузки и группового регулирования. Все это требует создания сложных моделей ЭЭС, СЭС с установками РГ и их регуляторами, а также выполнения трудоемких расчетов, учитывающих большое количество взаимосвязанных параметров системы. Существует и другой подход, когда можно использовать прогностические алгоритмы управления [13, 14], обеспечивающие работу регулятора по рассчитанному прогнозу погрешности управления. Наиболее просто реализовать прогнозирование с помощью линейной модели по двум значениям регулируемой величины: текущему и предыдущему. Многочисленные исследования на компьютерных моделях ЭЭС с установками РГ [15–17] показывают, что применение линейного прогнозирующего звена в АРВ и АРС позволяет улучшить показатели качества управления.

Ниже приведено описание метода регулирования напряжения и частоты для группы СГ небольшой мощности, описание компьютерных моделей установок РГ и предлагаемых групповых регуляторов прогностического типа. Исследования проводились в среде MatLab на модели изолированной СЭС с газотурбинными установками (ГТУ) и асинхронной нагрузкой, а также на модели СЭС с

малой ГЭС, имеющей связь с ЭЭС. Целью исследования являлось определение влияния предлагаемых прогностических групповых регуляторов напряжения и частоты для установок РГ на различные режимы работы системы электроснабжения.

МЕТОД ГРУППОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Частота переменного тока является важнейшим параметром режима работы ЭЭС, к которому предъявляются достаточно жесткие требования в части отклонения от номинального значения. Применение линейных прогнозирующих моделей, позволяющих усовершенствовать классические автоматические регуляторы скорости синхронных генераторов, дает возможность более эффективно стабилизировать частоту без изменения настроек регулятора [16]. При регулировании напряжения в ЭЭС можно также эффективно использовать прогностические АРВ СГ [15].

Линейное прогнозирующее звено (ЛПЗ), которое может использоваться в указанных выше регуляторах, описывается следующей передаточной функцией [13, 17]:

$$W_p(s) = T_p s + 1, \quad (1)$$

где T_p – постоянная времени прогнозирующего звена; s – оператор Лапласа.

Для определения постоянных времени ЛПЗ АРВ и АРС каждого агрегата предлагается использовать частоту собственных колебаний ротора одного из генераторов [18, 19]:

$$f_p = \frac{\sqrt{\frac{\omega_0 \cdot E_q \cdot U_g}{T_{je} X_d} \cdot \cos \delta}}{2\pi}, \quad (2)$$

где U_g – номинальное напряжение СГ, о.е.; δ – угол между напряжением и электродвижущей силой генератора E_q , эл. град.; X_d – индуктивное сопротивление генератора по

продольной оси, о.е.; ω_0 – номинальная угловая частота вращения ротора СГ, рад/с; T_{je} – эквивалентная постоянная механической инерции агрегата, с.

Постоянная времени ЛПЗ при этом будет определяться величиной обратно пропорциональной f_p , т.е. $T_p = 1/f_p$. Структурная схема предлагаемой системы регулирования напряжения и частоты установок РГ с помощью прогностических АРВ и АРС для отдельного СГ показана на рис. 1, в которой отдельным блокам отвечают следующие передаточные функции: W_G – передаточная функция СГ; W_E – передаточная функция возбудителя; W_T – передаточная функция турбины; W_{AVR} – передаточная функция АРВ; W_{ASR} – передаточная функция АРС; W_p – передаточная функция ЛПЗ (1). На рис. 1 обозначены следующие параметры: U_z – заданное значение напряжения СГ; U_f – напряжение на обмотке возбуждения СГ; ω_z – заданное значение скорости вращения ротора СГ; P_m – механическая мощность на валу турбины. Согласно выражению (2), частота f_p и обратно пропорциональная ей постоянная времени ЛПЗ T_p зависят от угла нагрузки δ СГ. При изменении режима работы предлагаемая на рис. 1 система регулирования автоматически вычисляет время прогноза и перенастраивает прогнозирующие звенья для АРВ и АРС.

Для группового регулирования параллельно работающих СГ один из них можно принять в качестве ведущего и определять постоянные времени ЛПЗ по углу нагрузки δ этого генератора. Использование метода ведущего генератора позволяет построить групповой прогностический автоматический регулятор скорости (ГПАРС) и групповой прогностический автоматический регулятор напряжения (ГПАРН). На рис. 2 показана структурная схема ГПАРС, в которой для каждого генератора определяется отклонение скорости вращения ротора $\Delta\omega$, поступающее на вход АРС. Воздействие на турбину и определение необходимой механической мощности для нормализации скорости вращения ротора при изменении нагрузки гене-

ратора выполняются через прогнозирующее звено, постоянная времени которого автоматически вычисляется и корректируется в случае изменения нагрузочного режима. Этот процесс происходит одновременно для всех параллельно работающих в группе генераторов. Структурная схема ГПАРН выглядит

аналогично, только в ней регулируемым параметром является напряжение генератора. Необходимо отметить, что в рассматриваемых ГПАРС и ГПАРН имеется только один блок, вычисляющий постоянную времени T_p для всех ЛПЗ в АРВ и АРС.

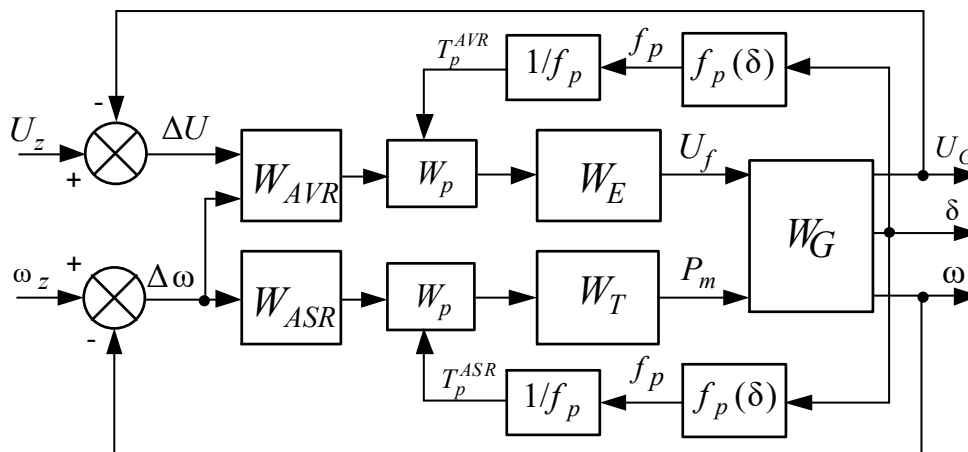


Рис. 1. Система регулирования напряжения и частоты, использующая линейное прогнозирующее звено в регуляторах возбуждения и скорости
 Fig. 1. Voltage and frequency control system using a linear predictive link in excitation and speed controllers

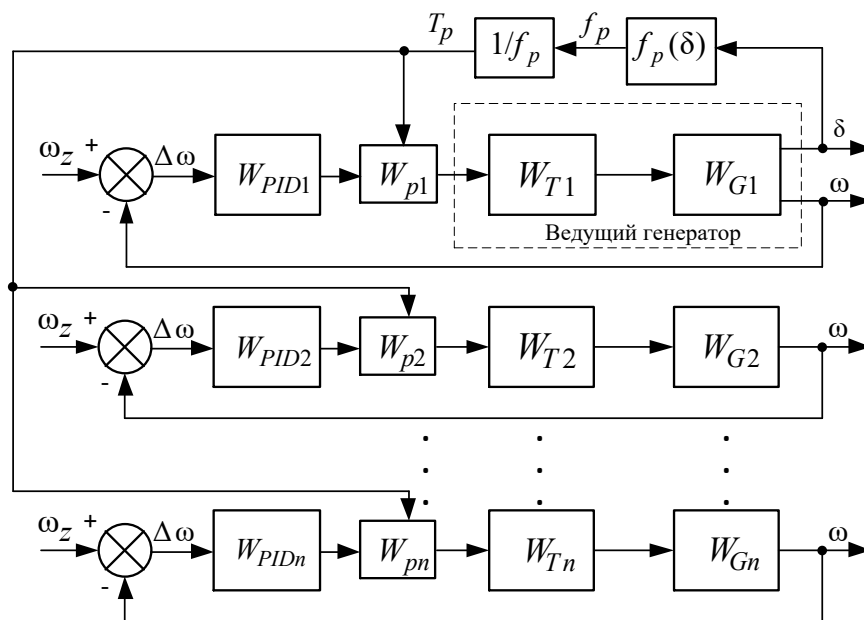


Рис. 2. Структурная схема группового прогностического автоматического регулятора скорости при использовании метода ведущего генератора: n – число агрегатов в группе со своими прогностическими автоматическими регуляторами скорости
 Fig. 2. Block diagram of the group predictive automatic speed regulator when using a master generator method: n – number of units in a group with their own predictive automatic speed regulators

ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ГРУППОВЫХ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ

Локальные АРС генераторов (блок W_{ASR} на рис. 1) моделировались регуляторами с пропорционально-интегрально-дифференциальными алгоритмами управления, описываемыми следующей передаточной функцией:

$$W_{ASR} = K_p + K_i \cdot \frac{1}{0.1s} + K_d \cdot \frac{1}{s+1},$$

где K_p , K_i , K_d – коэффициенты настройки АРС.

Используемая модель прогностического АРВ (блок W_{AVR} и последовательно соединенный с ним блок W_p на рис. 1) позволяет автоматически рассчитывать в зависимости от угла нагрузки δ ведущего генератора постоянные времени ЛПЗ и изменять их в различных режимах работы. При этом ЛПЗ в АРВ предлагается установить отдельно в канал регулирования по напряжению и отдельно в канал регулирования по частоте. Схема имитационной модели предлагаемого прогностического АРВ показана на рис. 3.

Прогностические звенья в ГПАРС и ГПАРН учитывались отдельно для каждого генератора, а блоки определения времени прогноза имели общую связь по углу нагрузки δ ведущего генератора. Схемы имитацион-

ных моделей предлагаемых ГПАРС и ГПАРН в общем виде показаны на рис. 4. Отдельный канал с прогнозирующим звеном в ГПАРС и ГПАРН представляет собой последовательное соединение усилителя с передаточной функцией $\frac{K_a}{T_a s + 1}$ и ЛПЗ с передаточной

функцией, определяемой выражением (1), что реализовано в схемах ГПАРС и ГПАРН в виде параллельного соединения блока $\frac{K_a s}{T_a s + 1}$, умноженного на время прогноза T_p , и блока усилителя. Параметры блоков можно принять следующими: $K_a = 1$; $T_a = 0,001$ с.

Таким образом, воздействия на турбины установок РГ осуществляются через ЛПЗ, встроенные в ГПАРС, входными сигналами которого являются выходные сигналы локальных АРС генераторов (PID1, PID2, PID3 на рис. 4 а) и угол нагрузки δ ведущего генератора. Выходные сигналы ГПАРС (Pm1, Pm2, Pm3) определяют механическую мощность турбин агрегатов установки РГ. Отличительной чертой ГПАРН является то, что его прогнозирующие звенья получаются встроенными в отдельные каналы регулирования АРВ генераторов по напряжению (входы dU_PD1, dU_PD2, dU_PD3 и выходы Uf11, Uf12, Uf13 на рис. 4 б) и по частоте (входы dw_PD1, dw_PD2, dw_PD3 и выходы Uf1, Uf2, Uf3 на рис. 4 б).

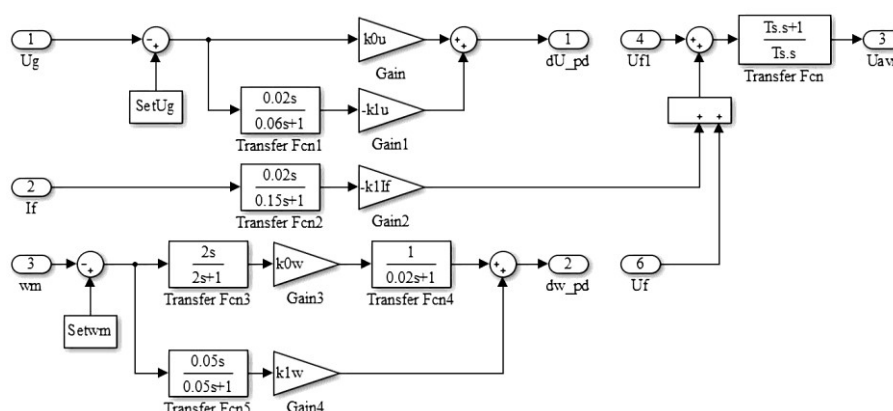


Рис. 3. Схема имитационной модели прогностического автоматического регулятора возбуждения:
 k_{0u} , k_{1u} , k_{1f} , k_{0w} , k_{1w} – коэффициенты настройки; T_s – постоянная времени общего канала регулирования (при моделировании принималась равной 0,5 с)

Fig. 3. Scheme of the simulation model of the predictive automatic excitation regulator: k_{0u} , k_{1u} , k_{1f} , k_{0w} , k_{1w} – adjustment factors; T_s – time constant of the common control channel (it is taken equal to 0.5 s in simulation)

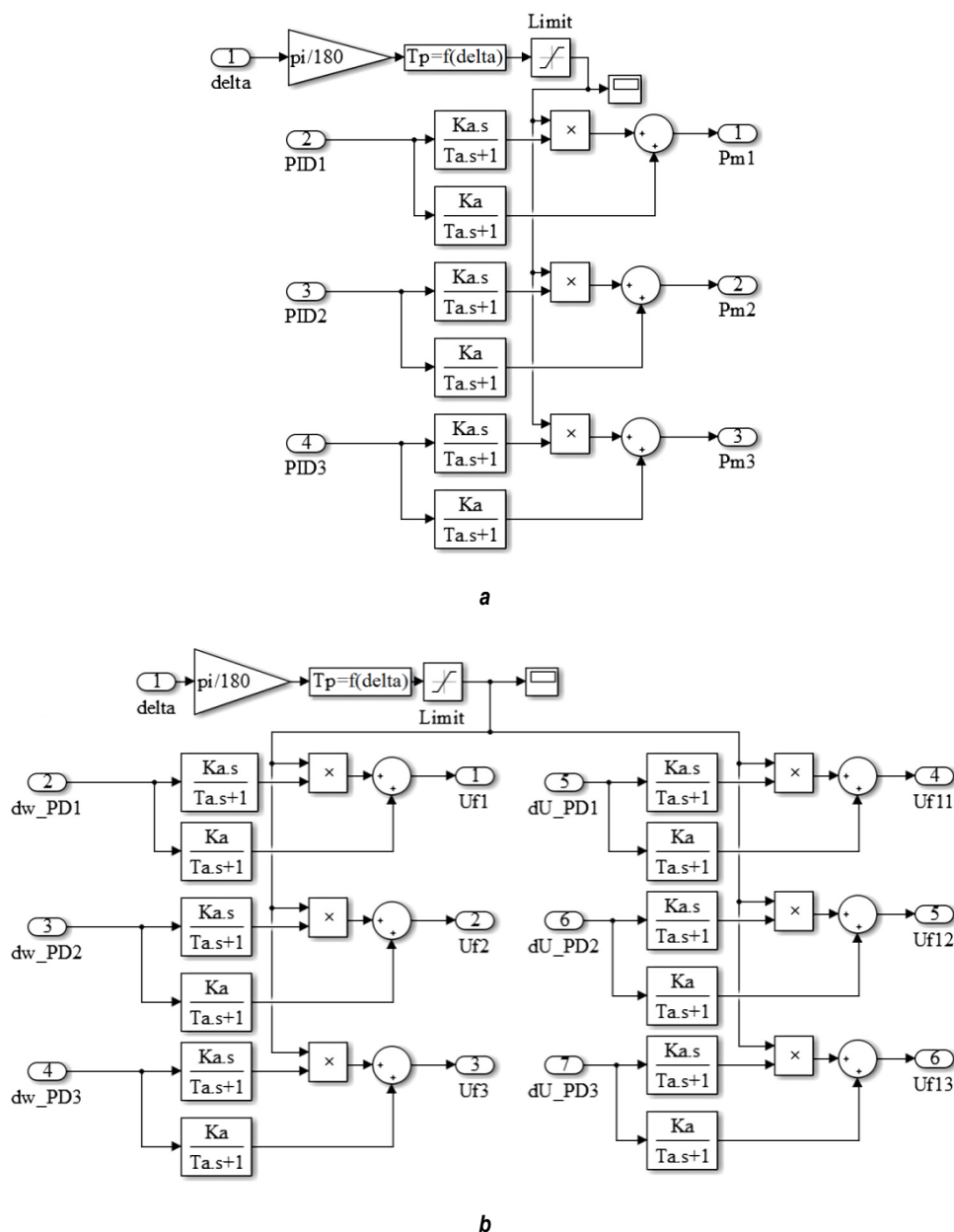


Рис. 4. Схемы имитационных моделей группового прогностического автоматического регулятора скорости (a) и группового прогностического автоматического регулятора напряжения (b)

Fig. 4. Schemes of simulation models of a group predictive automatic speed regulator (a) and a group predictive automatic voltage regulator (b)

ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИЗОЛИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ГАЗОТУРБИННЫМИ УСТАНОВКАМИ, РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Моделировалась изолированная СЭС с тремя параллельно работающими однотипными ГТУ. Схема разработанной в MatLab модели изолированной СЭС представлена на рис. 5. В составе изолированной СЭС рас-

сматривались статическая активно-индуктивная и асинхронная нагрузки, подключенные через линии электропередачи (блоки Line на рис. 5). В модели предусматривалось внесение возмущения в виде подключения дополнительной активно-индуктивной нагрузки мощностью $1.944 + j0.67$ МВ·А, запуска асинхронного электродвигателя мощностью 670 кВт (блок AD 670 kW на рис. 5), а также кратковременного трехфазного короткого замыкания (КЗ) с помощью блока

Three-Phase Fault. В качестве исходного принимался нормальный установившийся режим с загрузкой каждого генератора на 37%.

В ГТУ используются двухвальные газовые турбины (блоки Gas turbine на рис. 5), схемы имитационной модели которых представлены на рис. 6 [20]. Номинальная мощность моделируемых ГТУ составляла 2,5 МВт. Обозначенный на рис. 6 коэффициент K_t определяет долю мощности турбины газогенератора по отношению к номинальной мощности силовой турбины. При моделировании

$K_t = 0,55$, а передаточный коэффициент редуктора $K_r = 5,56$.

Возбудитель СГ (блок Excitation System на рис. 5) моделировался следующей передаточной функцией, характерной для тиристорного возбудителя [19]: $\frac{1}{0.025s + 1}$.

В качестве СГ использовалась стандартная модель MatLab, реализующая трехфазную синхронную машину, смоделированную в системе координат d-q, у которой обмотки

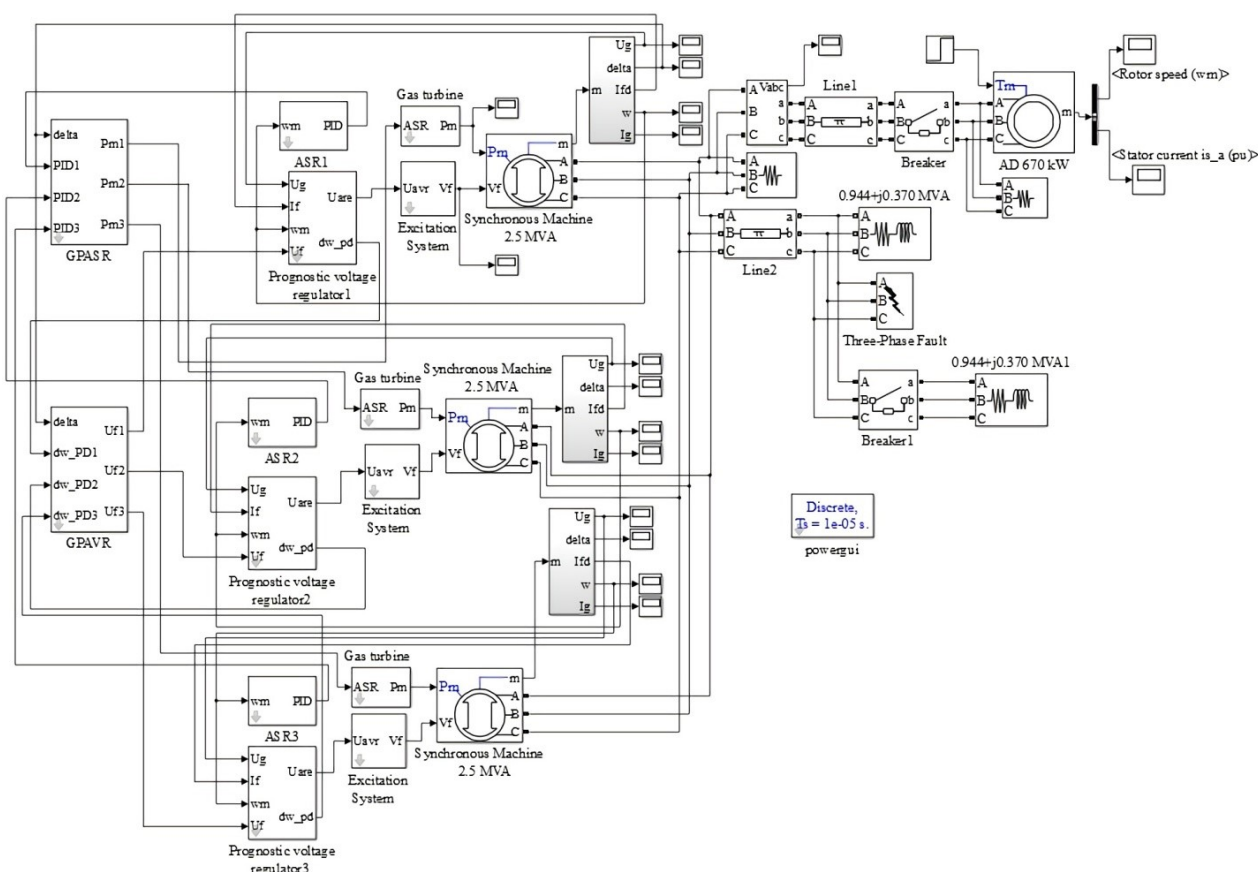


Рис. 5. Схема изолированной системы электроснабжения в MatLab
Fig. 5. Diagram of a stand-alone power supply system in MatLab

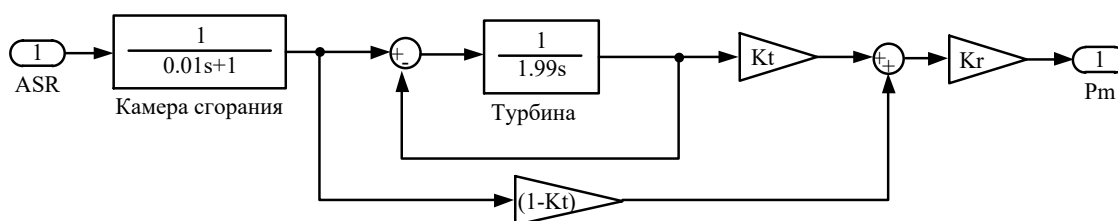


Рис. 6. Схема имитационной модели двухвальной газовой турбины
Fig. 6. Scheme of a simulation model of a two-shaft gas turbine

статора соединены звездой с внутренней нейтралью. При моделировании использовались следующие основные параметры СГ (блоки Synchronous Machine на рис. 1): $X_d = 2,34$ о.е.; $E_q = 1,25$ о.е.; $U_g = 1$ о.е. Эквивалентная постоянная механической инерции ГТУ (турбины и генератора) составляла $T_{je} = 3,76$ с.

При моделировании коэффициенты настройки локальных регуляторов принимались следующими для:

- АРС $K_p = 1$, $K_i = 1$ и $K_d = 0,1$;
- АРВ $k_{ou} = 1$, $k_{1u} = 1$,
 $k_{1f} = 0$, $k_{ow} = 1$, $k_{1w} = 1$.

В соответствии с приведенными параметрами СГ, постоянные времени прогнозирующих звеньев ГПАРС и ГПАРН определялись частотой собственных колебаний ротора агрегата по выражению: $1/0,614 \cdot \sqrt{\cos \delta}$.

Моделирование исследуемой СЭС выполнялось для следующих режимов:

- 1) пуск асинхронного электродвигателя мощностью 670 кВт;
- 2) подключение дополнительной статической активно-индуктивной нагрузки мощностью $1.944 + j0.67$ МВ·А;
- 3) трехфазное КЗ в СЭС длительностью 0,6 с.

Необходимо отметить, что для 2 и 3 режимов в составе СЭС уже работал асинхронный электродвигатель. Также требуется подчеркнуть, что настройка АРВ и АРС генераторов во всех рассматриваемых режимах и способах регулирования не изменялась.

Результаты моделирования пуска мощного асинхронного электродвигателя в виде временных зависимостей напряжения, скорости вращения ротора и угла нагрузки ведущего генератора показаны на рис. 7. На рис. 8 также представлена временная зависимость скорости вращения ротора двигателя при использовании различных систем управления ГТУ. По результатам моделирования можно отметить, что применение группового регулирования напряжения и частоты у однотипных ГТУ по сравнению с локальным регулированием позволяет достичь следующих эффектов: значительно уменьшаются провал напряжения во время пуска и перенапряже-

ние после пуска электродвигателя (рис. 7 а); снижается время переходного процесса и колебательность напряжения, а также скорости вращения ротора ведущего генератора (рис. 7 а, б); заметно уменьшается перерегулирование скорости вращения ротора генератора после пуска электродвигателя (рис. 7 б); более плавно изменяется угол нагрузки δ ведущего генератора (рис. 7 с). Следует отметить, что использование ГПАРС и ГПАРН по сравнению с локальным управлением с помощью прогностических АРВ и АРС дают заметный эффект только в регулировании напряжения (рис. 7 а: характеристики 2 и 3).

Использование прогностических алгоритмов в АРВ и АРС генераторов ГТУ уменьшает колебательность скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя при пуске (см. рис. 8). При этом групповое регулирование газотурбинных установок по сравнению с локальным регулированием также позволяет несколько уменьшить время пуска электродвигателя (см. рис. 8, характеристики 2 и 3).

Далее было выполнено моделирование режима подключения дополнительной активно-индуктивной нагрузки, когда в составе изолированной СЭС уже работал мощный асинхронный электродвигатель. Результаты моделирования в виде временных зависимостей напряжения и скорости вращения ротора ведущего генератора представлены на рис. 9. Полученные результаты показывают, что использование ГПАРС и ГПАРН по сравнению с локальным регулированием ГТУ прогностическими АРВ и АРС позволяет в 1,75 раза снизить максимальный провал напряжения при подключении дополнительной мощной нагрузки в СЭС (см. рис. 9, характеристики 2 и 3), а по сравнению с локальным регулированием ГТУ обычными АРВ и АРС – в 3,5 раза (рис. 9 а, характеристики 1 и 3). Применение прогностических алгоритмов в АРВ также позволяет исключить колебательность напряжения в рассматриваемом режиме (рис. 9 а). Локальное или групповое прогностическое регулирование напряжения и частоты по сравнению с использованием обычных АРВ и АРС дает возможность исключить колебательность, перерегулирова-

ние, а также уменьшить в 3 раза время переходного процесса скорости вращения ротора ведущего генератора ГТУ, а значит и частоты в изолированной СЭС (рис. 9 б).

Временные зависимости напряжения и скорости вращения ротора ведущего генератора при кратковременном трехфазном КЗ в СЭС показаны на рис. 10, по которым можно отметить следующее: применение прогностических алгоритмов уменьшает время пе-

реходного процесса, величину перерегулирования и колебательность напряжения и скорости вращения ротора ведущего генератора (рис. 10 а, б); использование ГПАРС и ГПАРН по сравнению с локальным регулированием несколько снижает провал напряжения и уменьшает время переходного процесса для напряжения, однако при этом наблюдается перенапряжение после отключения КЗ (рис. 10 а, характеристики 2 и 3).

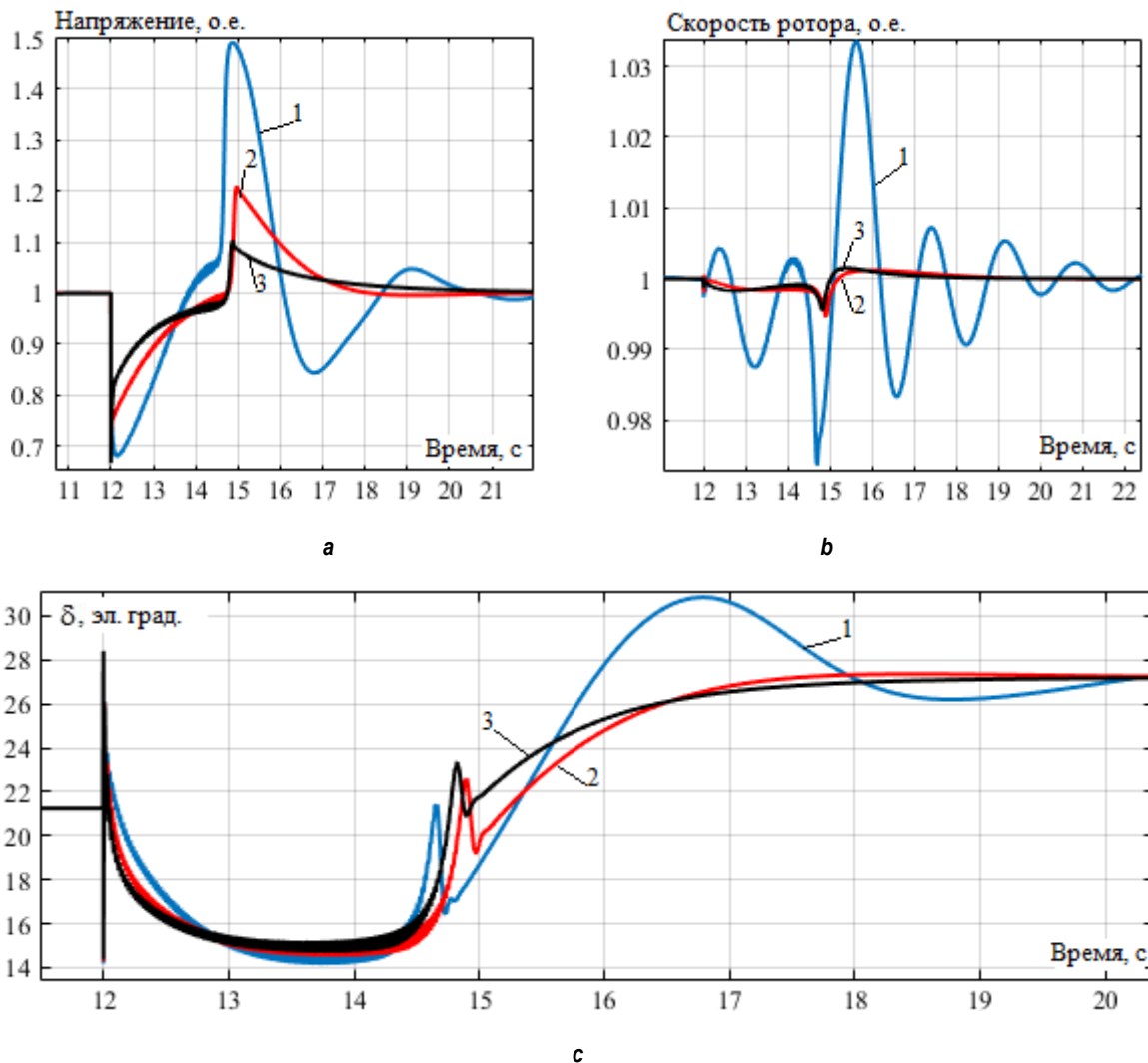


Рис. 7. Временные зависимости напряжения (а), скорости вращения ротора (б) и угла нагрузки (с) ведущего генератора при пуске мощного асинхронного двигателя: 1 – локальное регулирование напряжения и частоты с помощью обычных автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости; 2 – локальное регулирование напряжения и частоты с помощью прогностических автоматических регуляторов возбуждения и автоматических регуляторов скорости; 3 – использование группового прогностического автоматического регулятора скорости и группового прогностического автоматического регулятора напряжения

Fig. 7. Time dependences of voltage (a), rotor speed (b) and load angle (c) of the master generator when starting a powerful asynchronous motor: 1 – local control of voltage and frequency using conventional automatic excitation regulators and automatic speed regulators; 2 – local control of voltage and frequency using predictive automatic excitation regulators and automatic speed regulators; 3 – use of a group predictive automatic speed controller and a group predictive automatic voltage regulator

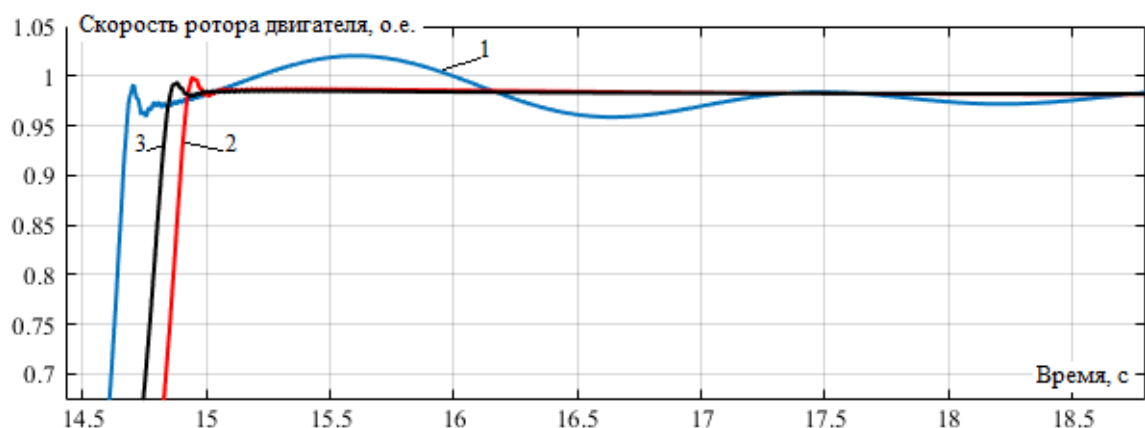
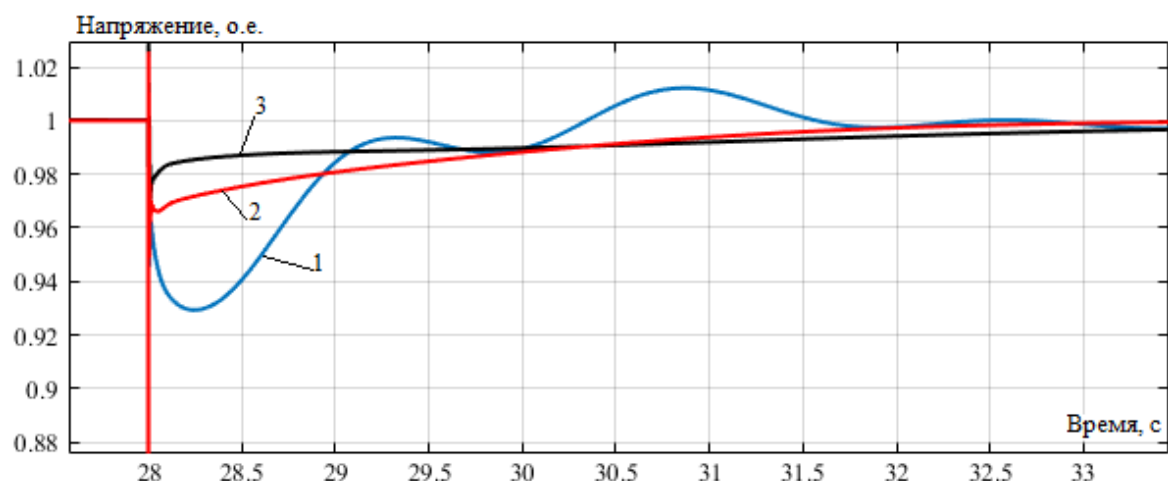
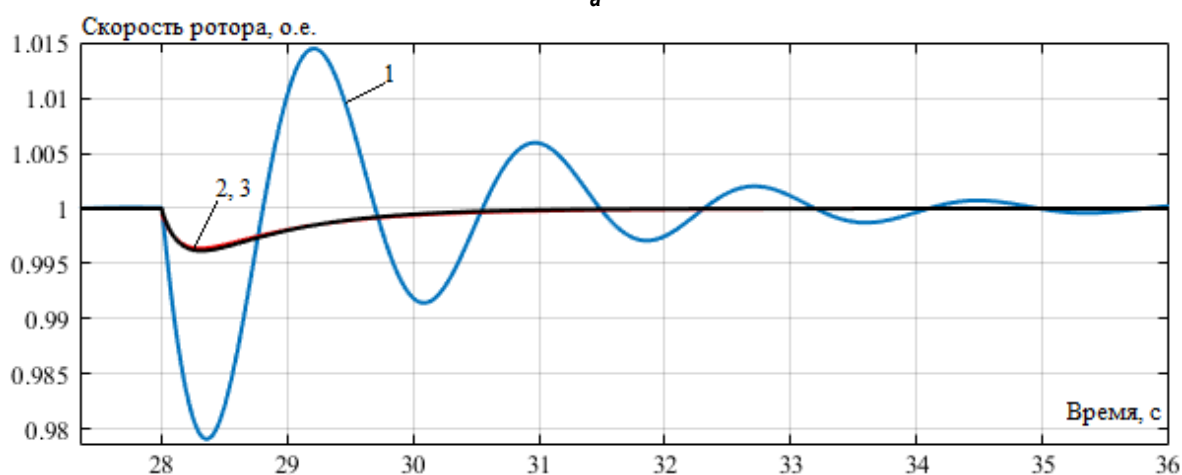


Рис. 8. Временные зависимости скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя при пуске: обозначения 1, 2 и 3 аналогичны рис. 7
 Fig. 8. Time dependences of the induction motor rotor speed at start-up: designators 1, 2 and 3 are similar to the Fig. 7



а



б

Рис. 9. Временные зависимости напряжения (а) и скорости вращения ротора (б) ведущего генератора при подключении в системах электроснабжения дополнительной нагрузки: обозначения 1, 2 и 3 аналогичны рис. 7

Fig. 9. Time dependences of voltage (a) and rotor speed (b) of the master generator when an additional load is connected to power supply systems: designators 1, 2 and 3 are similar to the Fig. 7

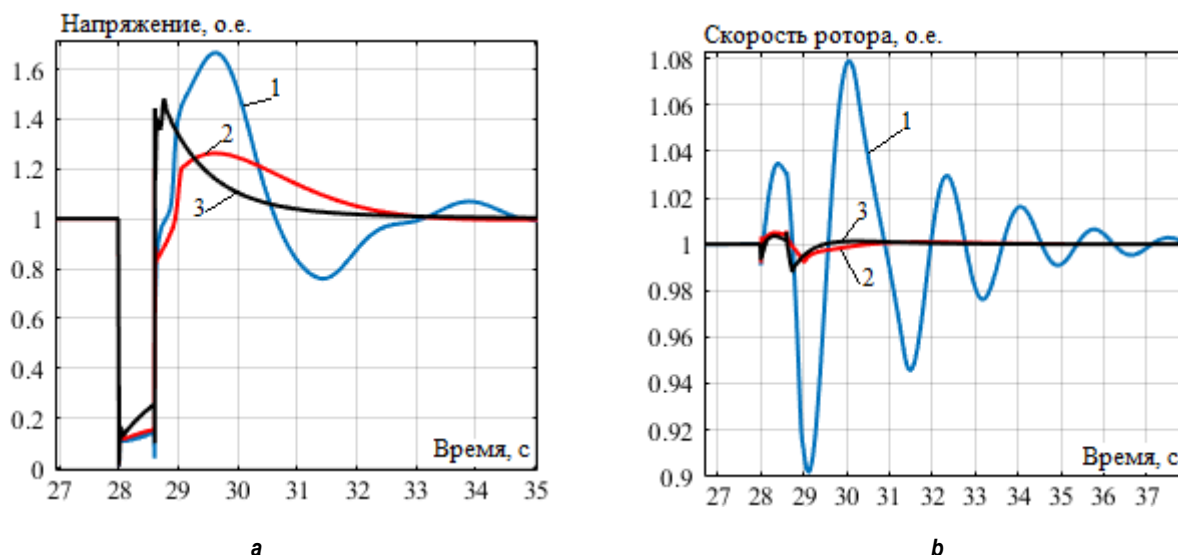


Рис. 10. Временные зависимости напряжения (а) и скорости вращения ротора (б) ведущего генератора при кратковременном трехфазном коротком замыкании в системе электроснабжения: обозначения 1, 2 и 3 аналогичны рис. 7

Fig. 10. Time dependences of voltage (a) and rotor speed (b) of the master generator under a short-term three-phase short circuit in the power supply system: designators 1, 2 and 3 are similar to the Fig. 7

ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МАЛОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Исследования проводились в среде MatLab с использованием разработанной с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems имитационной модели малой ГЭС, схема которой показана на рис. 11. Исследуемая малая ГЭС состоит из трех гидрогенераторов мощностью 3,125 МВ·А каждый и напряжением 6 кВ. Моделировались нормальные и аварийные режимы работы малой ГЭС, имеющей связь с ЭЭС через воздушную линию электропередачи (ВЛЭП) 6 кВ длиной 5 км, на приемном конце которой запитана нагрузка мощностью $9,3 + j1,8$ МВ·А (см. рис. 11).

В качестве исходного принимался нормальный установившийся режим с загрузкой каждого гидрогенератора на 50%. Остальная электроэнергия для питания потребителей в конце ВЛЭП поступала от ЭЭС. Схема разработанной имитационной модели в MatLab показана на рис. 12. В представленной модели имеется возможность вносить следующие возмущения (см. рис. 12): отключение связи с ЭЭС с помощью блока Breaker; кратковременное трехфазное КЗ с помощью блока Three-Phase Fault.

Структурная схема используемой модели гидротурбины с главным сервомотором (блоки Hydraulic turbine на рис. 12) представлена на рис. 13, где показаны соответствующие передаточные функции [18].

Модели возбуждателя и СГ аналогичны тем, что использовались для ГТУ. Использовались следующие значения основных параметров гидрогенератора: $X_d = 2,84$ о.е.; $E_q = 1,1$ о.е.; $U_g = 1$ о.е.; $T_{je} = 3,779$ с.

При моделировании коэффициенты настройки локальных регуляторов принимались следующими: для АРС $K_p = 7,55$; $K_i = 2$ и $K_d = 0,75$; для АРВ $k_{0u} = 100$; $k_{1u} = 50$; $k_{1ff} = 1$; $k_{0w} = 1,28$; $k_{1w} = 0,73$.

В соответствии с приведенными параметрами, СГ постоянные времени прогнозирующих звеньев ГПАРС и ГПАРН определялись частотой собственных колебаний ротора агрегата по выражению: $1 / 0,903 \cdot \sqrt{\cos \delta}$.

С использованием описанной имитационной модели исследовались следующие режимы:

1) переход режима работы малой ГЭС на выделенную нагрузку при отключении связи с ЭЭС со стороны приемного конца ВЛЭП выключателем Q1 (см. рис. 11);

2) кратковременное трехфазное КЗ на приемном конце ВЛЭП (см. рис. 11).

По результатам моделирования указанных режимов выполнялось сравнение показателей регулирования таких параметров режима ЭЭС, как углы нагрузки генераторов δ , напряжение на шинах малой ГЭС и частота переменного тока в сети при использовании обычных АРВ и АРС без прогнозирующего звена с типовой настройкой, прогностических АРВ и АРС, а также ГПАРС и ГПАРН, настроенных на резонансную частоту собственных колебаний ротора ведущего генератора малой ГЭС. Необходимо отметить, что настройка АРВ и АРС генераторов во всех рассматриваемых режимах и способах регулирования не изменялась.

На рис. 14 и 15 представлены временные зависимости параметров режима при отключении связи малой ГЭС с ЭЭС. Результаты моделирования показывают, что использование групповых прогностических регуляторов

напряжения и частоты положительно влияет на показатели качества управления по сравнению с локальным регулированием обычных или прогностических АРВ и АРС: уменьшается провал напряжения и частоты в сети (см. рис. 14); уменьшается время переходного процесса для частоты в сети (см. рис. 14 б); отсутствует перерегулирование напряжения на шинах малой ГЭС (см. рис. 14 а). При этом использование ГПАРС и ГПАРН позволяет практически исключить возможные колебания взаимного угла нагрузки двух генераторов малой ГЭС, что положительно влияет на внутригрупповые движения на станции, повышая устойчивость параллельной работы СГ (см. рис. 15).

Таким образом, использование ГПАРС и ГПАРН позволяет достичь положительного эффекта при регулировании напряжения и частоты в СЭС после отключения связи с ЭЭС без решения задачи настройки локальных регуляторов.

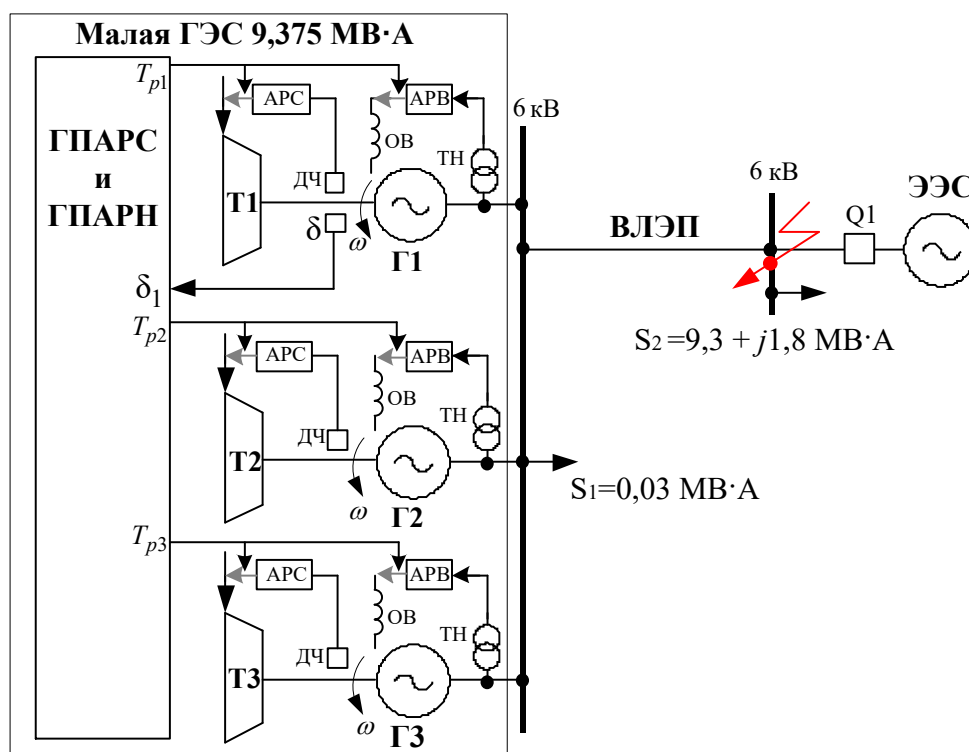


Рис. 11. Схема малой гидроэлектростанции с локальными и групповыми прогностическими автоматическими регуляторами: ДЧ – датчик частоты; ОВ – обмотка возбуждения;

ТН – трансформатор напряжения; Т – турбина; Г – генератор

Fig. 11. Diagram of a small hydroelectric power station with local and group predictive automatic regulators: ДЧ – frequency sensor; ОВ – excitation winding; ТН – voltage transformer; Т – turbine; Г – generator

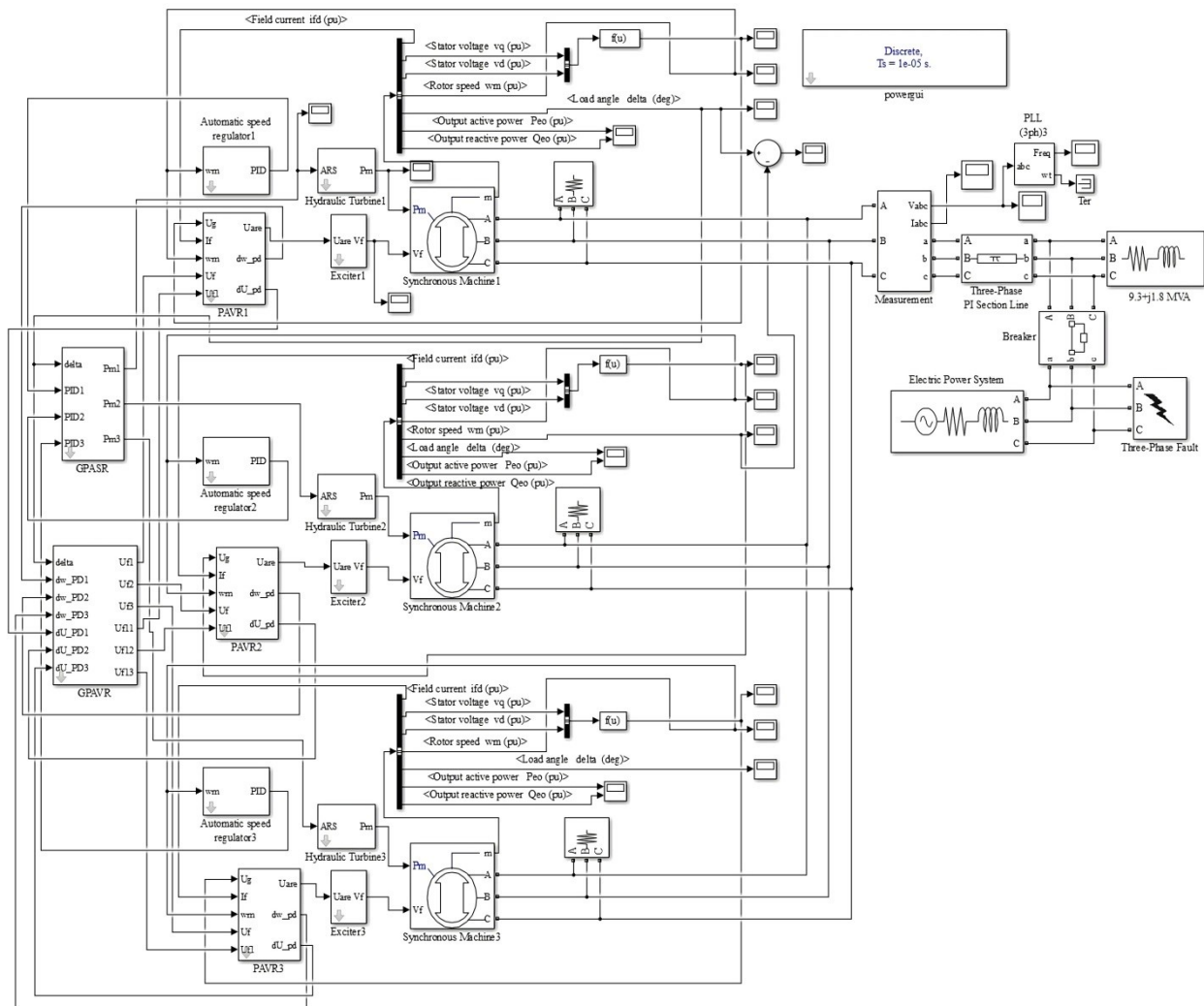


Рис. 12. Схема имитационной модели малой гидроэлектростанции в MatLab
Fig. 12. Scheme of a simulation model of a small hydroelectric power plant in MatLab

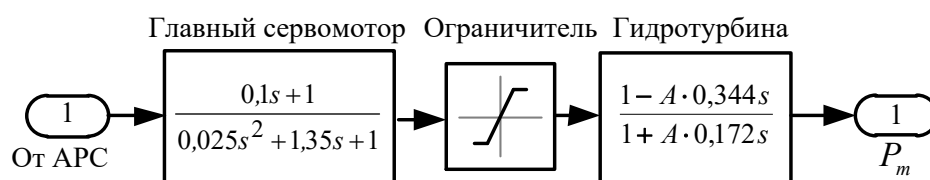


Рис. 13. Структурная схема модели гидротурбины с главным сервомотором:
A – положение открытия направляющего аппарата
Fig. 13. Block diagram of the hydroturbine model with the main servomotor:
A – opening position of the guide vane

На рис. 16 и 17 представлены временные зависимости параметров режима ЭЭС при трехфазном коротком замыкании длительностью 0,3 с. Результаты моделирования показывают, что использование ГПАРС и ГПАРН улучшает показатели качества управления по сравнению с локальным регулированием обычных или прогностических АРВ и АРС:

значительно уменьшается время переходного процесса и величина перерегулирования для напряжения на шинах малой ГЭС (рис. 16 а); значительно уменьшается колебательность напряжения после отключения КЗ (см. рис. 16 а); значительно уменьшается время переходного процесса и величина перерегулирования для частоты в сети (см. рис. 16 б);

уменьшается колебательность частоты в сети (см. рис. 16 б). Использование ГПАРС и ГПАРН в режиме кратковременного КЗ также позволяет исключить возможные колебания

взаимного угла нагрузки двух генераторов малой ГЭС, что положительно влияет на равномерность загрузки агрегатов и внутригрупповые движения на станции (рис. 17).

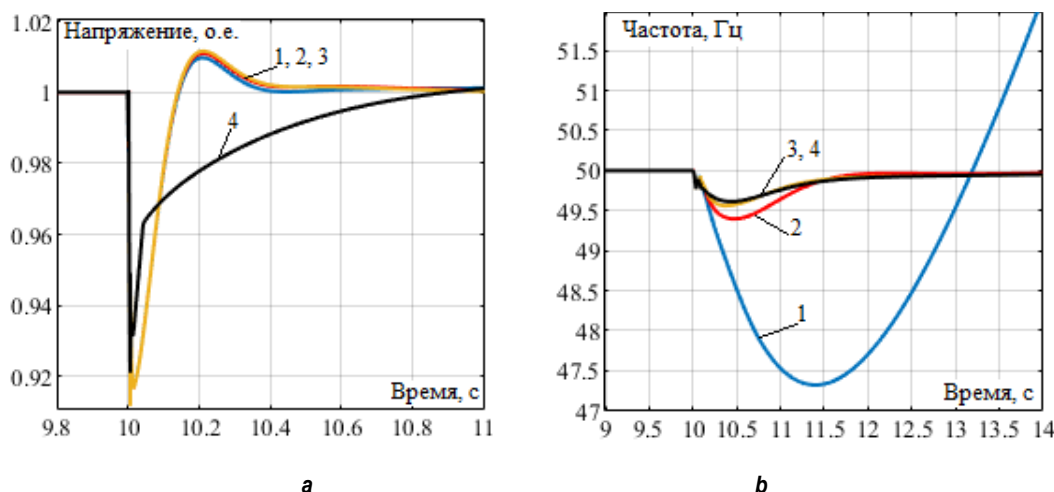


Рис. 14. Временные зависимости параметров режима работы систем электроснабжения при отключении связи с электроэнергетической системой: а – напряжение генератора; б – частота в сети; 1 – использовались обычные автоматические регуляторы возбуждения и автоматические регуляторы скорости без линейного прогнозирующего звена с типовой настройкой;

2 – локальное регулирование прогностическими автоматическими регуляторами возбуждения и скорости; 3 – использование группового прогностического автоматического регулятора скорости и обычных регуляторов возбуждения без линейного прогнозирующего звена; 4 – использование группового прогностического автоматического регулятора скорости и группового прогностического автоматического регулятора напряжения

Fig. 14. Time dependences of the operating mode parameters of power supply systems when the connection with the power grid is switched off: а – generator voltage; б – network frequency; 1 – conventional automatic excitation regulators and automatic speed regulators without a linear predictive link with a typical setting were used; 2 – local regulation by means of predictive automatic excitation and speed regulators; 3 – use of a group predictive automatic speed regulator and conventional excitation regulators without a linear predictive link; 4 – use of a group predictive automatic speed controller and a group predictive automatic voltage regulator

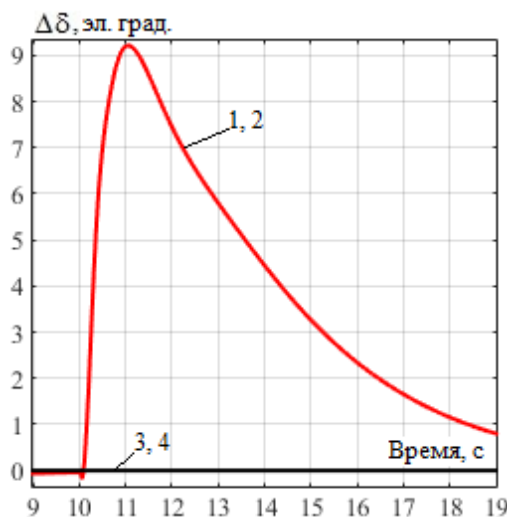


Рис. 15. Временные зависимости взаимного угла нагрузки двух генераторов $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$ при отключении связи с электроэнергетической системой: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис. 14

Fig. 15. Time dependences of the mutual load angle of two generators $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$ when the connection with the power grid is switched off: designators 1, 2, 3 and 4 are similar to the Fig. 14

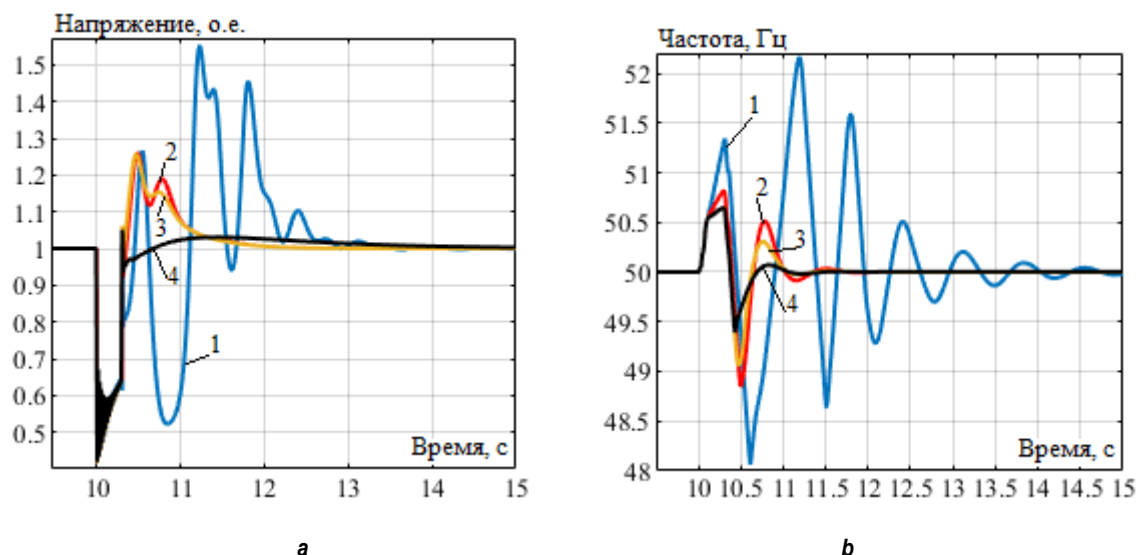


Рис. 16. Временные зависимости параметров режима исследуемой электроэнергетической системы при кратковременном трехфазном КЗ: а – напряжение генератора; б – частота в сети; обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис. 14

Fig. 16. Time dependences of the mode parameters of the studied power grid at a short-term three-phase short circuit: а – generator voltage; б – network frequency; designators 1, 2, 3 and 4 are similar to the Fig. 14

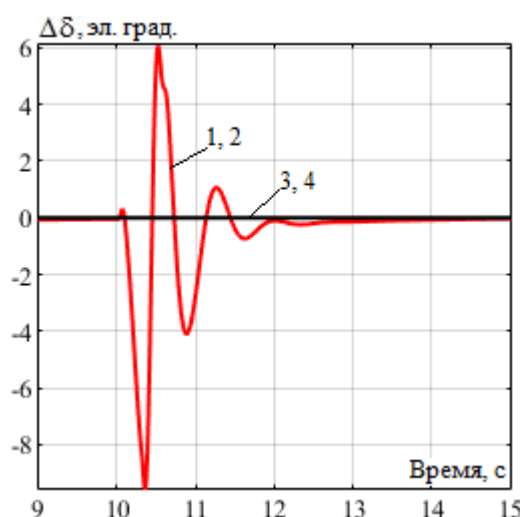


Рис. 17. Временные зависимости взаимного угла нагрузки двух генераторов $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$ при кратковременном трехфазном коротком замыкании: обозначения 1, 2, 3 и 4 аналогичны рис. 14

Fig. 17. Time dependences of the mutual load angle of two generators $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$ at a short-term three-phase short circuit: designators 1, 2, 3 and 4 are similar to the Fig. 14

Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтвердили эффективность использования групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты установок РГ, заключающуюся в положительном влиянии на качество управления параметрами ЭЭС в различных режимах работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты компьютерного мо-

делирования, можно сделать следующие выводы:

1. Групповое регулирование напряжения и частоты у однотипных ГТУ по сравнению с локальным регулированием позволяет значительно уменьшить провал напряжения во время пуска и перенапряжение после пуска мощного электродвигателя, снизить время переходного процесса и колебательность напряжения, а также скорость вращения ротора ведущего генератора, заметно умень-

шить перерегулирование скорости вращения ротора генератора после пуска электродвигателя. При этом более плавно изменяется угол нагрузки δ ведущего генератора и уменьшается колебательность скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя при пуске.

2. Использование ГПАРС и ГПАРН по сравнению с локальным регулированием ГТУ прогностическими АРВ и АРС позволяет в 1,75 раза снизить максимальный провал напряжения при подключении дополнительной мощной нагрузки в изолированной СЭС, а по сравнению с локальным регулированием ГТУ обычными АРВ и АРС – в 3,5 раза. Кроме того, локальное или групповое прогностическое регулирование напряжения и частоты по сравнению с использованием стандартных АРВ и АРС дает возможность исключить колебательность, перерегулирование, а также уменьшить в 3 раза время переходного процесса скорости вращения ротора ведущего генератора ГТУ.

3. Применение прогностических алгоритмов позволяет уменьшить время переходного процесса, величину перерегулирования и колебательность напряжения и скорости ротора генератора при кратковременном трехфазном КЗ в изолированной СЭС с ГТУ и мощной асинхронной нагрузкой; использование ГПАРС и ГПАРН по сравнению с локальным регулированием несколько снижает провал напряжения и уменьшает время переходного процесса для напряжения, однако при этом наблюдается перенапряжение после отключения КЗ.

4. Использование групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты для малой ГЭС положительно влияет на показатели качества управления по сравнению с локальным регулированием обычных или

прогностических АРВ и АРС. При отключении связи с ЭЭС уменьшается провал напряжения и частоты в сети, значительно снижается время переходного процесса для частоты в сети, а также исключается перерегулирование напряжения на шинах малой ГЭС.

5. Использование предлагаемых групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты для малой ГЭС при кратковременном трехфазном КЗ также улучшает показатели качества управления по сравнению с локальным регулированием обычных или прогностических АРВ и АРС: значительно уменьшается время переходного процесса и величина перерегулирования для напряжения на шинах станции; значительно уменьшается колебательность напряжения после отключения КЗ; практически в 1,5 раза уменьшается время переходного процесса и в 2,3 раза величина перерегулирования для частоты в сети; также уменьшается колебательность частоты в сети.

6. Использование ГПАРС и ГПАРН позволяет исключить возможные колебания взаимного угла нагрузки двух генераторов малой ГЭС во всех рассматриваемых режимах, что положительно влияет на равномерность загрузки агрегатов, внутригрупповые движения на станции, повышая устойчивость параллельной работы синхронных генераторов.

7. Предложены методы формирования и настройки групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты на основе определения резонансной частоты колебаний ротора ведущего генератора. Предложенный подход позволяет получить лучшие показатели качества управления напряжением и частотой в СЭС при сохранении прежних настроек АРВ и АРС синхронных генераторов.

Список источников

1. Fathabad A. M., Cheng Jianqiang, Pan Kai, Qiu Feng. Data-driven planning for renewable distributed generation integration // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. Vol. 35. Iss. 6. P. 4357–4368. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3001235>.
2. Melgar-Dominguez O. D., Pourakbari-Kasmaei M., Mantovani J.R.S. Adaptive robust short-term planning of

electrical distribution systems considering siting and sizing of renewable energy based DG units // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2019. Vol. 10. Iss. 1. P. 158–169. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2828778>.
3. Ehsan A., Yang Qiang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: a review of analytical techniques //

Applied Energy. 2018. Vol. 210. P. 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106>.

4. Ceseña E. A. M., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty // IEEE Power and Energy Society General Meeting (Boston, 17–21 July 2016). Boston: IEEE, 2016. Vol. 7. P. 348–357. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741088>.

5. Rezvani M. M., Mehraeen S. A new approach for steady-state analysis of a hybrid AC-DC microgrid // IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC) (Texas, 7–8 February 2019). Texas: IEEE, 2019. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2019.8662128>.

6. Liere-Netheler I., Schuldt F., Maydell K., Agert C. Simulation of incidental distributed generation curtailment to maximize the integration of renewable energy generation in power systems // Energies. 2020. Vol. 13. No. 16. P. 4173. <https://doi.org/10.3390/en13164173>.

7. Suslov K., Shushpanov I., Buryanina N., Ilyushin P. Flexible power distribution networks: new opportunities and applications // Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS). 2020. P. 57–64. <https://doi.org/10.5220/0009393300570064>.

8. Sikorski T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks // Power Quality Issues in Distributed Generation. 2015. <https://doi.org/10.5772/61172>.

9. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V. Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation // 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378834>.

10. Saad M. S., Jamaluddin H., Darus I. Z. M. Implementation of PID controller tuning using differential evolution and genetic algorithms // International Journal of Innovate Computing, Information and Control. 2012. Vol. 8. No. 11. P. 7761–7779.

11. Chen Ying, Ma Yong-jie, Yun Wen-xia. Application of Improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization // Telkomnika. 2013. Vol. 11. No. 3. P. 1524–1530. <https://doi.org/10.11591/telkomnika.v11i3.2301>.

12. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911456>.

13. Пикина Г. А. Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 3. С. 3–13.

14. Pikina G. A., Pashchenko F. F., Pashchenko A. F. Synthesis, research and comparative analysis of predictive control algorithms // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271646>.

15. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Nguen Van Huan. Simulation of gas turbine power plants with voltage and speed prognostic regulators // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2020. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208114>.

16. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Nguyen Van Huan. Automatic prognostic regulators of distributed generators // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602718>.

17. Pashchenko F., Pikina G., Rodomanova Yu. Universal searchless method for parametric optimization of predictive algorithms // 13th IEEE International Conference on Control & Automation (Ohrid, 3–6 July 2017). Ohrid: IEEE, 2017. P. 952–957. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2017.8003189>.

18. Бушуев В. В., Лизалек Н. Н., Новиков Н. Л. Динамические свойства энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.

19. Vittal V., McCalley J. D., Anderson P. M., Fouad A. A. Power system control and stability. 3rd Edition. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2019. 832 p.

20. Меркурьев Г. В., Шаргин Ю. М. Устойчивость энергосистем. В 2-х т., т. 2. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2008. 376 с.

References

1. Fathabad A. M., Cheng Jianqiang, Pan Kai, Qiu Feng. Data-driven planning for renewable distributed generation integration. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020;35(6):4357–4368. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3001235>.

2. Melgar-Dominguez O. D., Pourakbari-Kasmaei M., Mantovani J.R.S. Adaptive robust short-term planning of electrical distribution systems considering siting and sizing of renewable energy based DG units. In: *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2019;10(1):158–169. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2828778>.

3. Ehsan A., Yang Qiang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: a review of analytical techniques. *Applied Energy*. 2018;210:44–59.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106>.

4. Ceseña E. A. M., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 17–21 July 2016, Boston. Boston: IEEE; 2016, vol. 7, p. 348–357. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741088>.

5. Rezvani M. M., Mehraeen S. A new approach for steady-state analysis of a hybrid AC-DC microgrid. In: *IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*. 7–8 February 2019, Texas. Texas: IEEE; 2019, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2019.8662128>.

6. Liere-Netheler I., Schuldt F., Maydell K., Agert C. Simulation of incidental distributed generation curtailment to maximize the integration of renewable energy generation

in power systems. *Energies*. 2020;13(16):4173. <https://doi.org/10.3390/en13164173>.

7. Suslov K., Shushpanov I., Buryanina N., Ilyushin P. Flexible power distribution networks: new opportunities and applications. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*. 2020;57–64. <https://doi.org/10.5220/0009393300570064>.

8. Sikorski T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks. *Power Quality Issues in Distributed Generation*. 2015. <https://doi.org/10.5772/61172>.

9. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V. Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation. In: *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power: Proceedings of the International Conference*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378834>.

10. Saad M. S., Jamaluddin H., Darus I. Z. M. Implementation of PID controller tuning using differential evolution and genetic algorithms. *International Journal of Innovate Computing, Information and Control*. 2012;8(11):7761–7779.

11. Chen Ying, Ma Yong-jie, Yun Wen-xia. Application of improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization. *Telkomnika*. 2013;11(3):1524–1530. <https://doi.org/10.11591/telkomnika.v11i3.2301>.

12. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911456>.

13. Pikina G. A. The principle of predictive control and the ability to configure control systems with one parameter.

Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. 2014;3:5–13. (In Russ.).

14. Pikina G. A., Pashchenko F. F., Pashchenko A. F. Synthesis, research and comparative analysis of predictive control algorithms. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271646>.

15. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Nguen Van Huan. Simulation of gas turbine power plants with voltage and speed prognostic regulators. In: *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208114>.

16. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Nguyen Van Huan. Automatic prognostic regulators of distributed generators. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602718>.

17. Pashchenko F., Pikina G., Rodomanova Yu. Universal searchless method for parametric optimization of predictive algorithms. In: *13th IEEE International Conference on Control & Automation*. 3–6 July 2017, Ohrid. Ohrid: IEEE; 2017, p. 952–957. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2017.8003189>.

18. Bushuev V. V., Lizalek N. N., Novikov N. L. *Dynamic properties of power systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1995, 320 p. (In Russ.).

19. Vittal V., McCalley J. D., Anderson P. M., Fouad A. A. *Power system control and stability*. 3rd Edition. Hoboken: Wiley-IEEE Press; 2019, 832 p.

20. Merkuriev G. V., Shargin Yu. M. *Stability of power systems*. In 2 vol., vol. 2. Saint Petersburg: Non-state educational private institution of additional professional education Center for training energy personnel; 2008, 376 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Булатов Юрий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой энергетики,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия

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 24.08.2021; одобрена после рецензирования 06.10.2021; принята к публикации 26.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuri N. Bulatov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Power Engineering,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia

Contribution of the author

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

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 24.08.2021; approved after reviewing 06.10.2021; accepted for publication 26.10.2021.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 662.62:662.75:662.94.069

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-586-600>

Экспериментальные исследования влияния давления воздуха на характеристики распыления водоугольных суспензий

Дмитрий Васильевич Гвоздяков^{1✉}, Андрей Викторович Зенков²,
Владимир Евгеньевич Губин³, Альберт Жанатович Калтаев⁴,
Яна Владимировна Марышева⁵

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

^{2,3,4,5} Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

¹ dim2003@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

² avz41@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

³ gubin@tpu.ru

⁴ azk2@tpu.ru

⁵ marysheva@tpu.ru

Аннотация. Цель – обоснование влияния давления распыляющего агента на характеристики струи после распыления водоугольных суспензий с малыми (по массе) добавками в их состав жидких отходов пиролиза резинотехнических изделий и отработанного моторного масла по результатам экспериментальных исследований. В качестве резинотехнических изделий использовались автомобильные шины. Распыление производилось с помощью пневматической форсунки с внутренним смешением. Исследование изменения размеров капель после распыления исследовавшихся составов топлива выполнено методом IPI (Interferometric Particle Imaging). Определение угла раскрытия струи выполнено при помощи высокоскоростной камеры «Photron». Проведено исследование влияния давления распыляющего агента на характеристики струи после распыления водоугольных топлив с добавлением жидких отходов пиролиза резинотехнических изделий и отработанного моторного масла (от 3 до 12% по массе). Установлено, что снижение давления воздуха приводит к уменьшению угла раскрытия струи распыленной суспензии не более чем на 6%. При этом в струе образуются достаточно крупные капли размером более 600 мкм. Экспериментально доказано, что при использовании устройства распыления с камерой внутреннего смешения суспензии и воздуха большее количество мелких капель образуется при близких значениях давления топлива и воздуха. Число капель при этом больше на 2–9% в сравнении с типичным двухкомпонентным водоугольным топливом (угол раскрытия струи распыленных водоугольных суспензий в данном случае имеет наибольшее значение). Показано, что при использовании форсунки с камерой внутреннего смешения суспензии и распыляющего агента дробление капель топлива осуществляется за счет сил аэродинамического сопротивления окружающей среды. Таким образом, использование форсунки с камерой внутреннего смешения суспензии и воздуха снижает количество возможных механизмов дробления капель топлива после распыления.

Ключевые слова: водоугольное топливо, суспензия, нефтепродукты, распыление, давление, угол раскрытия струи

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением №075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).

Для цитирования: Гвоздяков Д. В., Зенков А. В., Губин В. Е., Калтаев А. Ж., Марышева Я. В. Экспериментальные исследования влияния давления воздуха на характеристики распыления водоугольных суспензий // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 586–600. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-586-600>.

Experimental studies into the effect of air pressure on the atomization characteristics of coal-water slurries

Dmitriy V. Gvozdyakov^{1✉}, Andrey V. Zenkov², Vladimir E. Gubin³,
Albert Zh. Kaltaev⁴, Yana V. Marysheva⁵

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

^{2,3,4,5}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Corresponding author: Dmitry V. Gvozdyakov, dim2003@tpu.ru

¹dim2003@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

²avz41@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

³gubin@tpu.ru

⁴azk2@tpu.ru

⁵marysheva@tpu.ru

Abstract. The paper studies the effect of atomizing agent pressure on the spray characteristics after spraying coal-water slurry that contains small additives of liquid waste from the pyrolysis of industrial rubber goods and used engine oil. The conducted experiments used automobile tires as the indicated rubber products; spraying was carried out employing an internal mixing pneumatic atomizer. Following the atomization of considered fuels, droplet size changes were studied using the interferometric particle imaging (IPI) technique. The spray angle was determined by means of a Photron high-speed camera. In addition, coal-water slurry containing liquid waste from the pyrolysis of industrial rubber goods and used engine oil (3–12 wt%) was sprayed to study the effect of atomizing agent pressure on the spray characteristics. A decrease in air pressure was found to reduce the spray angle by less than 6%, which resulted in the formation of rather large droplets exceeding 600 µm in size. It is experimentally confirmed that more fine droplets are formed at similar fuel and air pressures when using a spraying device equipped with an internal mixing chamber for slurry and air. The number of droplets, in this case, is 2–9% higher as compared to a typical two-component coal-water slurry fuel, with the spray angle of the sprayed coal slurry having the greatest value. When using an atomizer having an internal mixing chamber for slurry and an atomizing agent, fuel droplet breakup occurs due to the aerodynamic drag forces of the environment. Thus, the use of such atomizers reduces the number of possible breakup mechanisms for sprayed fuel droplets.

Keywords: coal-water fuel, slurry, oil products, spraying, pressure, jet expansion angle

Funding: The work was carried out with the financial support in accordance with the Supplementary Agreement No. 075-03-2021-138/3 on the provision of subsidy from the federal budget for funding the state assignment on public service provision (internal number 075-ГЗ/Х4141/687/3).

For citation: Gvozdyakov D. V., Zenkov A. V., Gubin V. E., Kaltaev A. Zh., Marysheva Ya. V. Experimental studies into the effect of air pressure on the atomization characteristics of coal-water slurries. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):586-600. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-586-600>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, как правило, в качестве топлива при производстве тепловой и электрической энергии на тепловых электростанциях используются природный газ, уголь, мазут и дизельное топливо [1, 2] (последнее в большинстве случаев в северных районах страны). При этом уголь остается доминирующим источником энергии не только в России, но и в мире [3]. Его доля в общем энергобалансе составляет порядка 38% [3, 4]. Согласно прогнозам Международного Энерге-

тического Агентства⁶, роль угля в мировом топливно-энергетическом балансе в ближайшие десятилетия будет оставаться прежней. Это позволяет сделать вывод о том, что генерация тепловой и электрической энергии на угольных электростанциях будет продолжаться.

Прямое сжигание углей, как известно, например [5, 6], сопровождается масштабными выбросами в атмосферу антропогенных продуктов высокотемпературного сгорания твердых топлив. Это является одной из

⁶World Energy Outlook 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019> (19.03.2021).

причин глобального загрязнения воздушного пространства, и как следствие ухудшения здоровья населения [2, 6]. Продукты сгорания углей (каменные и бурые), широко используемые в качестве основного топлива на тепловых электростанциях не только в России, но и в мире, содержат оксиды серы и азота, металлы, частицы пыли различного состава, газообразные продукты неполного сгорания топлива [7–10]. Наличие таких негативных факторов (с точки зрения экологии), сопровождающих угольную энергетику, сдерживает дальнейшее развитие отрасли, которое невозможно без создания и внедрения новых технологий топливосжигания при производстве тепловой и электрической энергии на тепловых электрических станциях, обеспечивающих безопасность окружающей среды.

Анализ литературных источников [11–14] показал, что в последнее десятилетие в мире становится привлекательным отказ от традиционного высокотемпературного сжигания угля при производстве тепловой и электрической энергии. Одним из перспективных видов топлива с точки зрения экологических показателей являются водоугольные суспензии (ВУС) [14]. Их использование в качестве топлива на тепловых электростанциях может обеспечить ряд преимуществ по критериям энергетики и экономики [15]: малые риски возникновения пожаров и взрывов, широкий спектр доступных компонентов суспензий и их низкая стоимость [14]. Но при этом есть и факторы, характерные для водоугольных суспензий, сдерживающих их широкое и повсеместное внедрение на объектах энергетики. Одним из таких факторов является образование достаточно крупных (500 мкм и более) капель после распыления. Зажигание капель таких топлив после распыления в камерах сгорания паровых и водогрейных котлов может происходить через 30 с и более [16–18]. Помимо этого, достаточно типичные двухкомпонентные водоугольные суспензии обладают низкой теплотой сгорания в сравнении с углем (меньше на 30–50%). Авторами, например [19–21], отмечается высокая целесообразность повышения эффективности процессов распыления многокомпонент-

ных топлив в камерах сгорания паровых и водогрейных котлов с целью снижения средних характерных размеров капель распыляемых топлив.

Одним из наиболее практически реализуемых способов повышения эффективности распыления и сжигания водоугольного топлива (ВУТ) может являться добавление в состав суспензии жидких горючих компонент, например, использованных нефтепродуктов. Такими веществами могут служить жидкие отходы переработки резинотехнических изделий (РТИ), в частности, отработавших автомобильных шин, и отработанное моторное масло. Повторное использование таких горючих компонент в настоящее время ограничено и приводит к их накоплению и хранению без возможности безопасной утилизации. Одним из вариантов решения этой проблемы является их использование в качестве добавок (компонент) водоугольных суспензий.

Известно [22–24], что введение в состав водоугольных суспензий третьих компонент, достаточно вязких в сравнении с водой или, например, спиртом, может существенно изменить характеристики струи (размер, скорость и число капель, угол раскрытия струи, дальность) после распыления таких топлив. Согласно [25], обеспечение минимальных характерных размеров капель жидкости после распыления возможно при определенных значениях соотношений давлений жидкости и распыляющего агента. Таким образом, актуальным для развития технологий водоугольных суспензий является проведение экспериментальных исследований влияния давления распыляющего агента на характеристики струи после распыления перспективных водоугольных суспензий.

Целью настоящей работы является обобщение по результатам экспериментальных исследований влияния давления распыляющего агента на характеристики струи после распыления водоугольных суспензий с малыми по массе добавками в их состав жидких отходов пиролиза резинотехнических изделий (автомобильные шины) и отработанного моторного масла. Для достижения сформулированной цели решены следующие задачи:

– исследование влияния давления распыляющего агента (воздух) на характеристики струи после распыления суспензий;

– установление соотношений давления топлива и воздуха, при которых размер и число капель малых размеров (менее 300 мкм) и угол раскрытия струи являются наибольшими.

Следует отметить, что вопросы влияния давления распыляющего агента на характеристики распыления водоугольных топлив в составе с жидкими горючими компонентами в литературных источниках раскрыты недостаточно.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Принципиальная схема приготовления водоугольного топлива представлена на рис. 1. При его подготовке использовался длиннопламенный уголь. Первоначально уголь измельчался в щековой дробилке (размер частиц на выходе не более 30 мм). Далее уголь измельчался в дезинтеграторе и просеивался при помощи вибросита с отбором материала фракцией не более 200 мкм. Мокрый помол осуществлялся в керамическом барабане объемом 3 л (массовое соотношение угля и помольных шаров составляло 1:1, продолжительность мокрого помола – 1 ч).

После этого в полученное водоугольное топливо добавлялась третья компонента в количестве 3, 5, 8 и 12% по массе (количество воды при этом снижалось на соответствующую величину добавки) и осуществлялось дополнительное перемешивание суспензии.

В табл. 1 представлены характеристики использовавшегося угля.

Таблица 1. Характеристики угля
Table 1. Coal characteristics

Параметр	Длиннопламенный уголь
Зольность A^d , %	4,1
Выход летучих V^{daf} , %	40,6
Содержание углерода, % daf	73,3
Содержание водорода, % daf	6,5
Суммарная доля кислорода, азота и серы, % daf	20,2
Влажность, %	15,0

В процессе приготовления водоугольных суспензий использовались вода, жидкие отходы переработки резинотехнических изделий и отработанное моторное масло (ОММ) при температуре 293 К. Их основные свойства представлены в табл. 2. При проведении экспериментов температура топлив составляла 293 К.

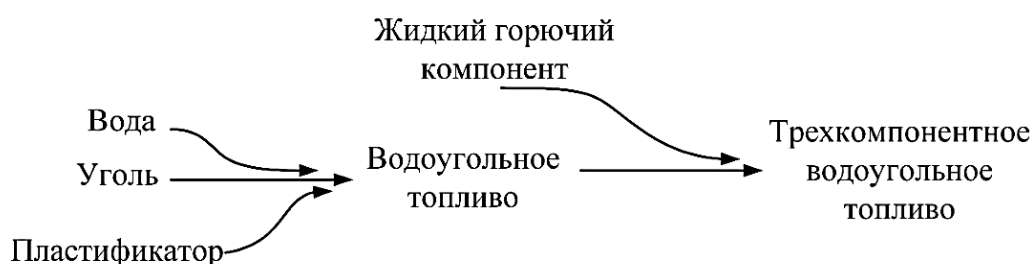


Рис. 1. Этапы подготовки топливной суспензии
Fig. 1. Stages of slurry fuel preparation

Таблица 2. Характеристики жидких компонентов водоугольных суспензий
Table 2. Characteristics of coal-water slurry liquid components

Компонент	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, мПа·с	Коэффициент поверхностного натяжения, мН/м
Отработанное моторное масло	905	1225	73,5
Отходы переработки резинотехнических изделий	929	1190	73,1
Вода	998 [1]	890 [2]	72,75

Известно, что в состав водоугольных топлив принято добавлять поверхностно-активные вещества, обеспечивающие стабильность суспензий. Анализ результатов исследований [26] по проблемам ВУТ показал, что NaOH допустимо использовать в качестве присадки-пластификатора водоугольных суспензий. Данный компонент стабилизирует однородность состава приготовленного топлива, препятствует его расслоению, является доступным и недорогим материалом. При проведении экспериментальных исследований гидроксид натрия применялся в качестве присадки-пластификатора водоугольных суспензий в количестве не более 1% по массе.

Высокоскоростная регистрация струи (размеры капель, их концентрация и угол раскрытия) распыленных водоугольных топлив выполнена методом Interferometric Particle Imaging (IPI) согласно [27, 28]. Обработка изображений осуществлялась при помощи программного обеспечения ActualFlow, разработанного компанией «Сигма-Про» (г. Новосибирск) [27, 28]. Определение угла раскрытия струи выполнено при помощи высокоскоростной камеры фирмы «Photron». Следует отметить, что известно несколько способов определения угла раскрытия струи. Так, в [29] отмечается, что нет единой мето-

дики для определения этой величины. Некоторые исследователи для определения геометрии струи используют прямую линию, проходящую через верхнюю часть контура струи [30, 31]. В [32, 33] предлагается использовать прямую подгонку с применением линейной регрессионной посадки на распылительной кромке. Значение угла (θ) раскрытия установлено после обработки не менее 20 снимков каждого состава. Значение усредненной величины угла раскрытия струи определялось по формуле:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i}{n},$$

здесь θ_i – значение угла раскрытия струи на i -м изображении; n – общее число изображений.

Погрешность измерений с учетом возможных источников погрешности (таких как локальный градиент скорости, смещение капли, оптические эффекты и т.д.) не превышала 2% аналогично [27, 28]. В момент подсвечивания области исследования импульсом лазера осуществлялись фото- и видеорегистрация струи. Принципиальная схема стенда для регистрации капельной струи водоугольных топлив после распыления представлена на рис. 2.

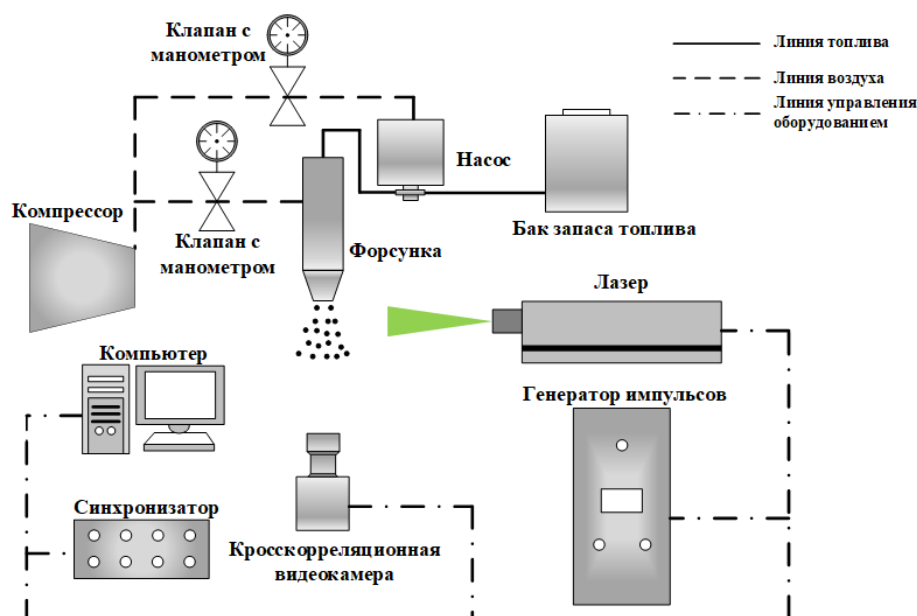


Рис. 2. Принципиальная схема стенда
Fig. 2. Schematic diagram of the test bench

Для каждого исследовавшегося состава водоугольной суспензии выполнено не менее 5 измерений. При обработке полученных результатов суммарное распределение капель топлива ($\sum n_i$) на всех изображениях нормировалось к их общему числу $\sum K$ (идентифицированные капли):

$$N = \frac{\sum n_i}{\sum K} \cdot 100\%.$$

Экспериментальные исследования характеристик струи распыленных ВУТ выполнены в аэродинамическом имитаторе камеры сгорания энергетического котла (рис. 3). Подача водоугольной суспензии осуществлялась из емкости-накопителя топлива при помощи мембранного насоса с пневматическим приводом. В качестве распыляющего агента суспензии использовался воздух (температура 293 К), нагнетаемый компрессором на пневматическую форсунку. Струя распыленного

топлива подсвечивалась лазерным ножом (лазер Beamtech Vlite-200 с двойным импульсом), ориентированным по продольной оси факела.

При проведении экспериментов использовалась форсунка с камерой внутреннего смешения топлива и воздуха аналогично [25] для распыления суспензионного топлива, выполненная из нержавеющей стали. Она состоит из трех частей: корпуса с входными каналами для топлива и распыляющего агента, а также двух съемных головок. Способ соединения корпуса и головок – резьбовой. Продольный разрез форсунки представлен на рис. 4.

Время проведения эксперимента для каждого состава составляло 100–120 с. Такой интервал времени является достаточным для формирования стабильной структуры струи. Размеры области исследования составляли в продольном направлении струи

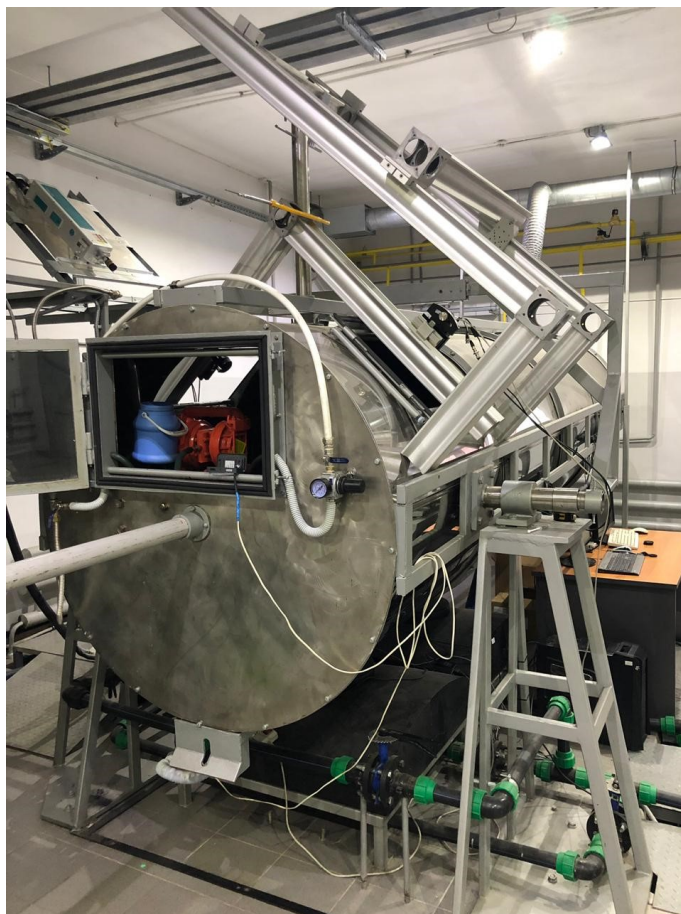
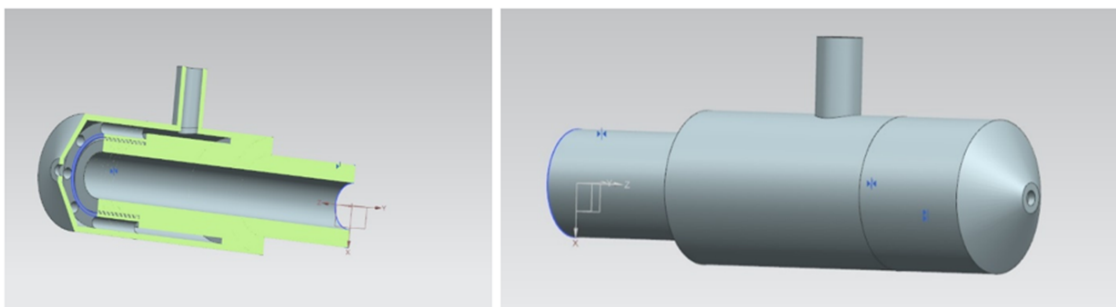


Рис. 3. Общий вид экспериментального стенда
Fig. 3. General view of the experimental test bench



Параметр	Значение
Внешний диаметр форсунки d_1 , мм	20
Диаметр входного канала топлива d_2 , мм	8
Диаметр входного канала воздуха d_3 , мм	4
Высота канала подачи воздуха в камеру смешения d_4 , мм	2
Диаметр выходного устья форсунки d_5 , мм	3

Рис. 4. Устройство распыления водоугольных суспензий
Fig. 4. Device for coal-water slurry spraying

0,1 м, перпендикулярно оси 0,05 м. Эксперименты выполнены в хорошо воспроизводимых условиях при температуре окружающей среды 293 К и относительной влажности 65%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изменение угла раскрытия струи после распыления водоугольного топлива.
На рис. 5–7 показаны результаты высокоско-

ростной визуализации исследовавшихся процессов в виде фотографий. На представленных изображениях углы раскрытия струи водоугольных топлив после распыления обозначены линиями красного цвета. Представленные результаты иллюстрируют влияние значения давления воздуха на значение величины θ для всех исследовавшихся составов суспензий и типичного двухкомпонентного водоугольного топлива.

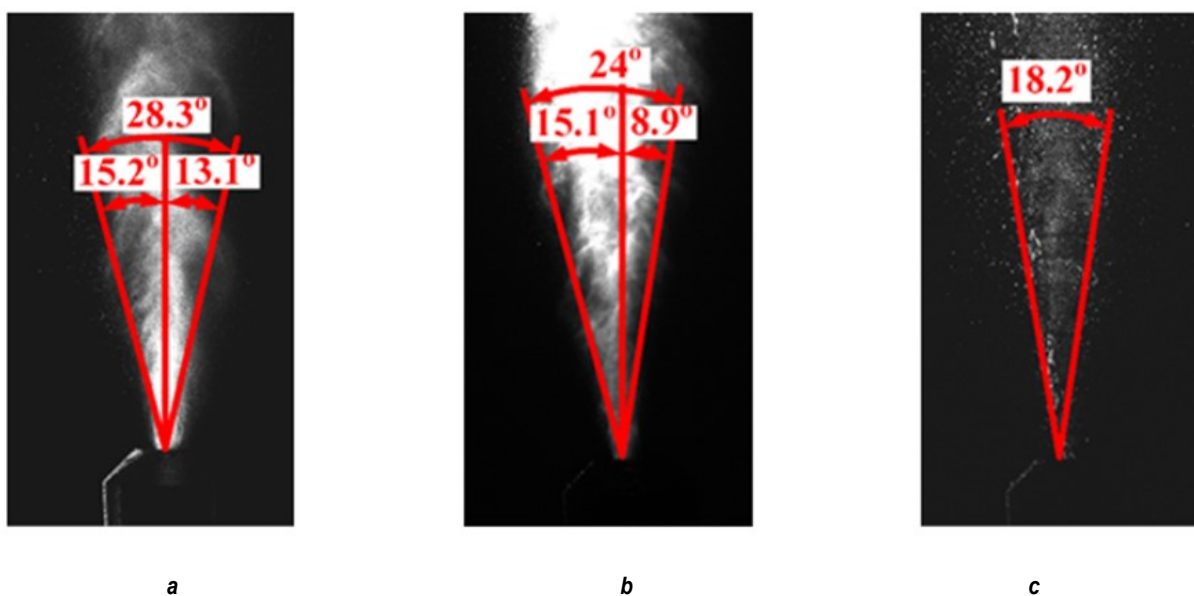


Рис. 5. Угол раскрытия струи после распыления двухкомпонентного водоугольного топлива:
a – $P_m = 0,3/P_e = 0,28$ (МПа); b – $P_m = 0,3/P_e = 0,2$ (МПа); c – $P_m = 0,3/P_e = 0,1$ (МПа)

Fig. 5. Jet expansion angle after spraying of two-component coal-water fuel: a – $P_f = 0.3/P_a = 0.28$ (MPa);
b – $P_f = 0.3/P_a = 0.2$ (MPa); c – $P_f = 0.3/P_a = 0.1$ (MPa)

Результаты проведенных экспериментов показали существенное влияние параметров (давление жидкости – P_m и воздуха – P_e) на угол раскрытия струи (рис. 5 а, 5 б, 5 с). При близких значениях давления топлива и воздуха взаимодействие между фазами (уголь, вода, воздух) является наибольшим (рис. 5 а). Струя в таком случае имеет однородную структуру и наибольший угол раскрытия [25, 34].

На рис. 6 представлены типичные результаты измерения угла раскрытия струи после распыления ВУТ с добавлением 3% и 12% жидких отходов переработки РТИ при различных значениях давления воздуха.

Результаты экспериментальных исследований показали, что введение в состав ВУТ такой жидкой горючей компоненты (не более 3% по массе) оказывает влияние на угол раскрытия струи при всех заданных значениях соотношений давлений топлива и воздуха. При близких соотношениях значений $P_m/P_e = 0,3 \text{ МПа}/0,28 \text{ МПа}$, $P_m/P_e = 0,2 \text{ МПа}/0,18 \text{ МПа}$ и $P_m/P_e = 0,1 \text{ МПа}/0,08 \text{ МПа}$ исследуемый параметр (θ) отличается не более чем на 5,0%. Рост концентрации (до 12% по массе) в состав ВУТ жидких отходов переработки резинотехнических изделий также оказывает влияние на угол раскрытия струи при всех заданных значениях соотношений давлений топлива и воздуха. При практически равных значениях давления топлива и воздуха –

$P_m/P_e = 0,3 \text{ МПа}/0,28 \text{ МПа}$, $P_m/P_e = 0,2 \text{ МПа}/0,18 \text{ МПа}$ и $P_m/P_e = 0,1 \text{ МПа}/0,08 \text{ МПа}$ исследовавшийся параметр (θ) отличается не более чем на 3,0%.

На рис. 7 представлены результаты измерения угла раскрытия струи после распыления ВУТ с добавлением 3% и 12% отработанного моторного масла при различных значениях давления воздуха.

Результаты выполненных экспериментальных исследований показали, что введение в состав ВУТ третьей жидкой горючей компоненты (ОММ не более 3% по массе) оказывает значительное влияние на угол раскрытия струи при всех заданных значениях соотношений давлений топлива и воздуха аналогично добавке жидких отходов резинотехнических изделий. При близких соотношениях значений $P_m/P_e = 0,3 \text{ МПа}/0,28 \text{ МПа}$, $P_m/P_e = 0,2 \text{ МПа}/0,18 \text{ МПа}$ и $P_m/P_e = 0,1 \text{ МПа}/0,08 \text{ МПа}$ исследовавшийся параметр (θ) отличается не более чем на 1,5%. Рост концентрации (до 12% по массе) в состав ВУТ использованного автомобильного масла также оказывает влияние на угол раскрытия струи при всех заданных значениях соотношений давлений топлива и воздуха. При близких соотношениях значений $P_m/P_e = 0,3 \text{ МПа}/0,28 \text{ МПа}$, $P_m/P_e = 0,2 \text{ МПа}/0,18 \text{ МПа}$ и $P_m/P_e = 0,1 \text{ МПа}/0,08 \text{ МПа}$ исследовавшийся параметр (θ) отличается не более чем на 6%.

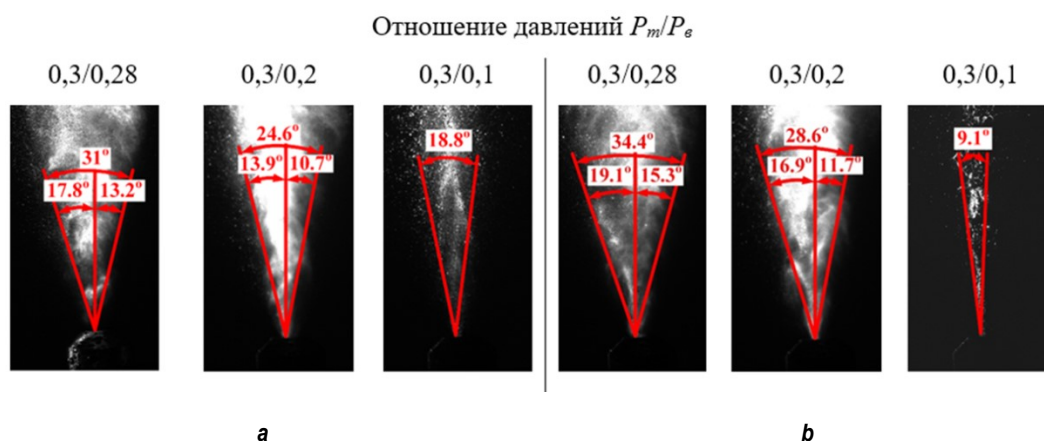


Рис. 6. Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля с добавлением жидких отходов пиролиза резинотехнических изделий: а – водоугольное топливо +3% отходов пиролиза резинотехнических изделий; б – водоугольное топливо +12% отходов пиролиза резинотехнических изделий

Fig. 6. Jet expansion angle after spraying of water-coal fuel based on long-flame coal with addition of liquid waste of rubber product pyrolysis: a – water-coal fuel + 3% of rubber product pyrolysis waste; b – water-coal fuel +12% of rubber product pyrolysis waste

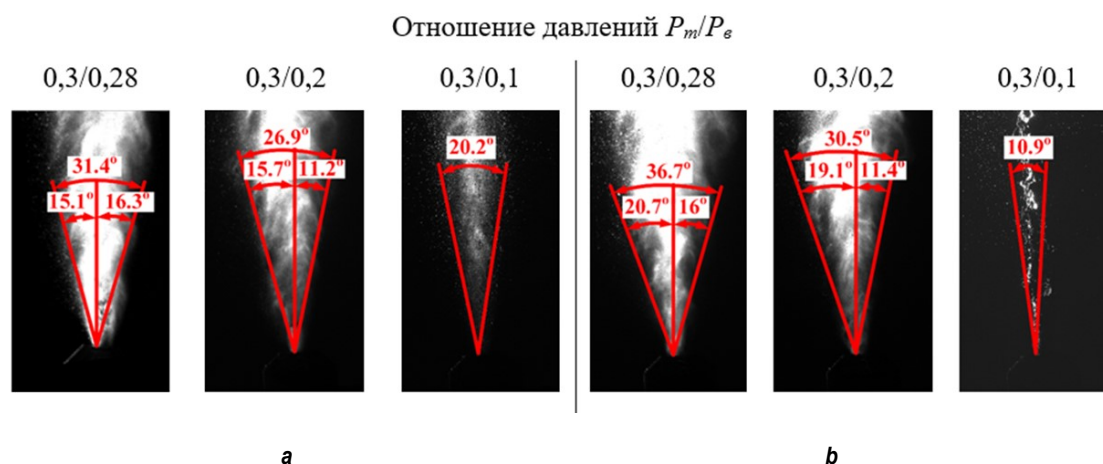


Рис. 7. Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля с добавлением отработанного моторного масла: а – водоугольное топливо +3% отработанного моторного масла; б – водоугольное топливо +12% отработанного моторного масла

Fig. 7. Jet expansion angle after spraying of coal-water fuel based on long-flame coal with the addition of spent engine oil: а – coal-water fuel + 3% of spent engine oil; б – coal-water fuel +12% of spent engine oil

Полученные результаты показывают, что снижение давления воздуха при постоянном давлении топлива приводит к уменьшению угла раскрытия струи. При близких значениях давления топлива и воздуха наблюдается более активное взаимодействие между фазами уголь-вода-жидкая горючая добавка-воздух. Стоит отметить, что при значительном преобладании давления топлива над давлением распыляющего агента (см. рис. 6 и 7) распыления потока практически не происходит, и он принимает вид тонкой, практически однофазной струи.

Изменение размеров и числа капель после распыления водоугольного топлива. На рис. 8 представлены распределения капель водоугольного топлива по характерным размерам и числу в области исследования на отрезке 25–100 мм по продольной оси струи в виде гистограмм. Результаты экспериментов позволяют оценить влияние третьей горючей компоненты и давления суспензии и воздуха на распределение капель топлива по характерным размерам при семи исследованных соотношениях P_m/P_e . Гистограммы иллюстрируют закономерность увеличения числа крупных капель (более 200 мкм) при снижении давления распыляющего агента. В случае преобладания давления воздуха увеличивается число малых капель (менее 200 мкм) суспензии после рас-

пыления. Это объясняется тем, что в камере смешения устройства распыления преобладает расход воздуха. Взаимодействие топлива и распыляющего агента при этом незначительно. В результате струя состоит, как правило, из аэрозольных частиц компонент суспензии. Такие тенденции изменения числа и характерного размера капель справедливы для ВУТ в составе с жидкими отходами переработки резинотехнических изделий и использованного машинного масла.

Результаты экспериментов показали, что снижение давления воздуха при постоянном давлении топлива приводит к увеличению количества средних (200–600 мкм) и крупных капель (более 600 мкм) после распыления ВУТ. При этом после распыления суспензии с добавлением жидких отходов переработки РТИ при отношении давлений $P_m = 0,3/P_e = 0,2$ (МПа) и $P_m = 0,3/P_e = 0,1$ (МПа) образуется в среднем на 5% и 9%, соответственно, меньше капель малого размера (до 200 мкм), чем при отношении давлений $P_m = 0,3/P_e = 0,28$ (МПа). Схожая тенденция наблюдается и для ВУТ с добавлением отработанного моторного масла: при отношении давлений $P_m = 0,3/P_e = 0,2$ (МПа) и $P_m = 0,3/P_e = 0,1$ (МПа) образуется в среднем на 2 и 7%, соответственно, меньше капель малого размера (до 200 мкм), чем при отношении давлений $P_m = 0,3/P_e = 0,28$ (МПа).

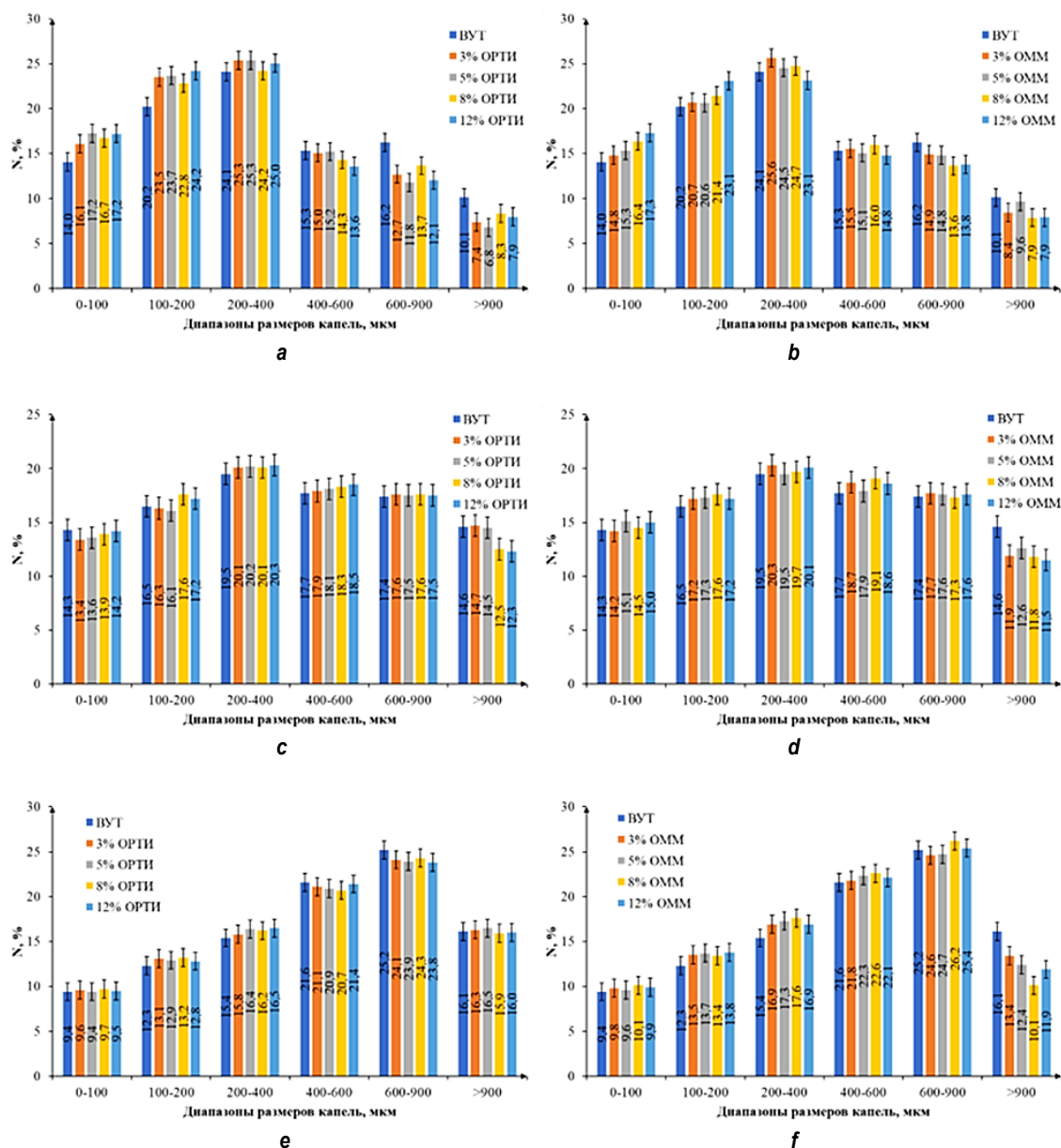


Рис. 8. Распределение капель водоугольной суспензии по размерам после распыления в области исследования по осевой координате на отрезке 25–100 мм: а, d – $P_m = 0,3/P_a = 0,28$ (МПа); б, e – $P_m = 0,3/P_a = 0,2$ (МПа); c, f – $P_m = 0,3/P_a = 0,1$ (МПа)

Fig. 8. Distribution of coal-water slurry droplets by size after spraying in the study area along the axial coordinate within the segment of 25–100 mm: a, d – $P_f = 0.3/P_a = 0.28$ (MPa); b, e – $P_f = 0.3/P_a = 0.2$ (MPa); c, f – $P_f = 0.3/P_a = 0.1$ (MPa)

По результатам выполненных экспериментов сформулирована физическая модель процесса формирования капель суспензий после ее распыления. На начальном отрезке (примерно 0–25 мм по осевой координате) струя распыленной суспензии, как правило, состоит из крупных (до 1 мм) капель различной формы (рис. 5 с, рис. 6 и 7) – вытянутый эллипс, цилиндр, деформированный диск и т.д., аналогично [35]. По мере удаления от устройства распыления крупные капли (бо-

лее 600 мкм) разрушаются за счет сил аэродинамического сопротивления внешней среды. Формирование капель размерами не более 200 мкм происходит преимущественно на отрезке 50–100 мм от устройства распыления. Идентичные траектории движения таких групп капель могут способствовать ускорению процесса их коагуляции. Это объясняет наличие в струе достаточно крупных (400 мкм и более на достаточном расстоянии от устья сопла форсунки) капель после рас-

пыления (см. рис. 5 с, рис. 6 и 7) как обычно-го ВУТ, так и водоугольных суспензий в составе с жидкими отходами переработки резинотехнических изделий или отработанного автомобильного масла.

Следует отметить, что отличительной особенностью распыления жидкостей форсункой с камерой внутреннего смешения топлива и воздуха является то, что в струе после распыления жидкости, в отличие от устройств распыления [36], обеспечивающих первичное разрушение струи в непосредственной близости к устью сопла (форсунки с внешним смешением жидкости и распыляющего агента), дробление капель жидкости происходит преимущественно за счет сил аэродинамического сопротивления окружающей среды.

Полученные результаты иллюстрируют целесообразность проведения дальнейших экспериментальных исследований с использованием форсунки с внешним смешением жидкости и распыляющего агента, например [36].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования влияния давления распыляющего

агента на характеристики струи после распыления водоугольных топлив с добавлением отработанных нефтепродуктов. Установлено, что уменьшение давления воздуха приводит к снижению угла раскрытия струи после распыления на 1,5–6,0% при введении в состав водоугольного топлива от 3 до 12% (по массе) жидких отходов переработки резинотехнических изделий или отработанного моторного масла. Определено, что в процессе распыления при близких отношениях давления топлива и воздуха образуется большее количество мелких капель – на 2–9% в сравнении с типичным двухкомпонентным водоугольным топливом. Также в этом случае угол раскрытия струи наибольший, следовательно, близкие значения давления топлива и распыляющего агента являются оптимальными для распыления водоугольных топлив с добавлением нефтепродуктов. Использование форсунки с камерой внутреннего смешения суспензии и воздуха снижает количество возможных механизмов дробления капель топлива после распыления, их разрушение осуществляется преимущественно за счет сил аэродинамического сопротивления окружающей среды.

Список источников

1. Касимов А. М., Ковалёв А. А., Поваляева А. В. Утилизация отходов электростанций, работающих на твердом и жидком топливе // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 4. № 8. С. 15–20.
2. Тауд Р. Перспективы развития тепловых электростанций на органическом топливе // Теплоэнергетика. 2000. № 2. С. 68–72.
3. Square J. Statistical review of world energy. 69th edition. 2020. London: Heriot-Watt University, 2020. 66 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (19.03.2021).
4. Макарова А. А., Митрова Т. А., Кулагина В. А. Прогноз развития энергетики мира и России 2019. М.: Институт энергетических исследований Российской академии наук; Московская школа управления Сколково, 2019. 211 с. [Электронный ресурс]. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf (19.03.2021).
5. Филиппова С. П., Кейко А. В. Газификация угля: на перепутье. Технологические факторы // Теплоэнергетика. 2021. № 3. С. 45–58. <https://doi.org/10.1134/S0040363621030048>.
6. Досмухамедов Н. К., Егизиков М. Г., Жолдасбай Е. Е., Курмансеитов М. Б., Аргын А. А. Поведение NO_x при очистке отходящих газов ТЭС карбонатным расплавом щелочных металлов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 1. С. 30–34.
7. Максимов В. Ю., Каменских А. В., Байгара А. Применение технологии Overfire Air в разработке методов сокращения вредных выбросов в атмосферу // Вопросы устойчивого развития общества. 2021. № 5. С. 465–480.
8. Ахметшин М. Р., Няшина Г. С., Медведев В. В. Антропогенные газовые выбросы при сжигании суспензионных топлив и отходов нефтепереработки // Кокс и химия. 2021. № 4. С. 36–43. https://doi.org/10.52351/00232815_2021_04_36.
9. Сучков С. И., Сомов А. А. Разработка мер подавления образования оксидов азота в ПГУ с внутрицикловой газификацией углей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 4. С. 84–92.
10. Пугачев Н. С. Влияние ТЭС на окружающую среду // Наука через призму времени. 2021. № 7. С. 32–33.

11. Franco A., Diaz A. R. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control // *Energy*. 2009. Vol. 34. Iss. 3. P. 348–354. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.012>.
12. Рябов Г. А., Санкин Д. А., Фоломеев О. М. Сжигание и газификация топлив в химических циклах – новое применение технологии циркулирующего кипящего слоя для улавливания CO₂ // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2014. № 5. С. 27–36.
13. Тиханов М. В., Пузырев Е. М. Опыт внедрения низкотемпературной вихревой технологии сжигания твердых топлив // *Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации»*. 2021. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/01/94461> (07.05.2021).
14. Бекмуратова Б. Т. Процессы снижения ВЭТ и управления горением топливной эмульсии // *Бюллетень науки и практики*. 2021. Т. 7. № 1. С. 300–304. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/63/19>.
15. Мурко В. И., Черникова О. П. Повышение экологичности и эффективности городской системы теплоснабжения с использованием водоугольного топлива // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2021. № 3. С. 18–22. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-18-22>.
16. Вершинина К. Ю., Лыршиков С. Ю., Стрижак П. А. Зажигание топливных суспензий, приготовленных на основе отходов обогащения угля и нефтепродуктов // *Физика горения и взрыва*. 2018. Т. 54. № 3. С. 137–146. <https://doi.org/10.15372/FGV20180316>.
17. Накоряков В. Е., Стрижак П. А., Глушков Д. О., Сыродой С. В. Иницирование горения капли органического топлива в вихревой камере сгорания // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 473. № 6. С. 646–649. <https://doi.org/10.7868/S0869565217120040>.
18. Mchale E. T. Coal-water fuel combustion // *Symposium (International) on Combustion*. 1988. Vol. 21. Iss. 1. P. 159–171. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(88\)80243-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80243-1).
19. Шадрин Е. Ю., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В. Исследование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива с использованием пневматической форсунки // *Прикладная механика и техническая физика*. 2021. Т. 62. № 3. С. 165–171. <https://doi.org/10.15372/PMTF20210316>.
20. Dafsari R. A., Lee Hyung Ju, Han Jeongsik, Park Dong-Chang, Lee Jeekeun. Viscosity effect on the pressure swirl atomization of an alternative aviation fuel // *Fuel*. 2019. Vol. 240. P. 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.132>.
21. Minakov A. V., Shebeleva A. A., Strizhak P. A., Chernetskiy M. Yu., Volkov R. S. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals // *Fuel*. 2019. Vol. 254. P. 115606. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.014>.
22. Vershinina K. Yu., Lyrshchikov S. Yu., Strizhak P. A. Ignition of fuel slurries based on waste products of coal processing and oil refining // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2018. Vol. 54. Iss. 3. P. 376–384.
23. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 218. P. 106864. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106864>.
24. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries // *Energy*. 2021. Vol. 230. P. 120900. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120900>.
25. Han Han, Wang Pengfei, Li Yongjun, Liu Ronghua, Tian Chang. Effect of water supply pressure on atomization characteristics and dust-reduction efficiency of internal mixing air atomizing nozzle // *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31. Iss. 1. P. 252–268. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.10.017>.
26. Roh Nam-Sun, Shin Dae-Hyun, Kim Dong-Chan, Kim Jong-Duk. Rheological behaviour of coal-water mixtures. 2. Effect of surfactants and temperature // *Fuel*. 1995. Vol. 74. Iss. 9. P. 1313–1318. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00085-J](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00085-J).
27. Alekseenko S. V., Abdurakipov S. S., Hrebtov M. Y., Tokarev M. P., Markovich D. M. Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: a tomographic PIV study // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018. Vol. 70. P. 363–379. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.12.009>.
28. Alekseenko S. V., Bilsky A. V., Dulin V. M., Markovich D. M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007. Vol. 28. Iss. 6. P. 1340–1359. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.
29. Daviault S. G., Ramadan O. B., Matida E. A., Hughes P. M., Hughes R. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer // *Fuel*. 2012. Vol. 98. P. 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.042>.
30. Pastor J. V., Arrègle J., Palomares A. Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test // *Applied Optics*. 2001. Vol. 40. Iss. 17. P. 2876–2885. <https://doi.org/10.1364/AO.40.002876>.
31. Delacourt E., Desmet B., Besson B. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques // *Fuel*. 2005. Vol. 84. Iss. 7-8. P. 859–867. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.12.003>.
32. Morgan R., Wray J., Kennaird D. A., Crua C., Heikal M. R. The influence of injector parameters on the formation and break-up of a diesel spray // *Journal of Engines*. 2001. Vol. 110. Iss. 3. P. 389–399. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0529>.
33. Hang J., Bae C., Lee K. O. Initial development of non-evaporating diesel sprays in common-rail injection systems // *International Journal of Engine Research*. 2003. Vol. 4. Iss. 4. P. 283–298. <https://doi.org/10.1243/146808703322743895>.
34. Wang Pengfei, Zhang Kui, Liu Ronghua. Influence of air supply pressure on atomization characteristics and dust-suppression efficiency of internal-mixing air-assisted atomizing nozzle // *Powder Technology*. 2019. Vol. 355. P. 393–407. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.040>.
35. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of the influence of the liquid drop size and velocity on the parameters of drop deformation in air // *Technical Physics Scientific Journal*. 2015. Vol. 60. Iss. 8. P. 1119–1125.

36. Пат. № 2523816, Российская Федерация, С1. Пневматическая форсунка (варианты) / С. В. Алексеев, Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, А. И. Кравченко;

заявитель и патентообладатель ООО «Протэн-К» Заявл. 22.01.2013; опубл. 27.07.2014. Бюл. № 11.

References

1. Kasimov A. M., Kovalev A. A., Povalyaeva A. V. Waste disposal of power plants operating on solid and liquid fuels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010;4(8):15-20.
2. Taud R. Development prospects of thermal power plants operating on organic fuel. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2000;2:68-72. (In Russ.).
3. Square J. *Statistical review of world energy*. 69th edition. 2020. London: Heriot-Watt University; 2020, 66 p. Available from: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> [Accessed 19th March 2021].
4. Makarova A. A., Mitrova T. A., Kulagina V. A. *Forecast of energy sector development in the world and Russia in 2019*. Moscow: The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences; Skolkovo Moscow School of Management, 2019, 211 p. Available from: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf [Accessed 19th March 2021]. (In Russ.).
5. Filippova S. P., Kejko A. V. Coal gasification: at the crossroad. Technological factors. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2021;3:45-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363621030048>.
6. Dosmukhamedov N. K., Egizekov M. G., Zholdasbay E. E., Kurmanseitov M. B., Argyn A. A. Behavior of NO_x during purification of exhaust gases of TPP carbonate melt of alkaline metals. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Basic Research*. 2021;1:30-34. (In Russ.).
7. Maksimov V. Yu., Kamenskikh A. V., Baygara A. Application of "OVERFIRE AIR" technology to development of methods to reduce harmful emissions to the atmosphere. *Voprosy ustojchivogo razvitiya obshchestva*. 2021;5:465-480.
8. Ahmetshin M. R., Nyashina G. S., Medvedev V. V. Anthropogenic gases emission during combustion slurry fuels from oil processing waste. *Koks i himiya*. 2021;4:36-43. https://doi.org/10.52351/00232815_2021_04_36. (In Russ.).
9. Suchkov S. I., Somov A. A. Development of measures suppressing the formation of nitrogen oxides in the gasification-combined cycle plant. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2015;4:84-92. (In Russ.).
10. Pugachev N. S. Thermal power plant influence on the environment. *Nauka cherez prizmu vremeni*. 2021;7:32-33. (In Russ.).
11. Franco A., Diaz A. R. The future challenges for "clean coal technologies": Joining efficiency increase and pollutant emission control. *Energy*. 2009;34(3):348-354. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.012>.
12. Ryabov G. A., Sankin D. A., Folomeev O. M. The implementation of circulating fluidized bed technology for CO₂ capture. Chemical looping combustion and gasification. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2014;5:27-36. (In Russ.).
13. Tihanov M. V., Puzyrev E. M. Implementation experience of low-temperature vortex technology of solid fuel combustion. *Electronic scientific & practical journal «Modern scientific researches and innovations»*. 2021;1. Available from: <https://web.snauka.ru/issues/2021/01/94461> [Accessed 7th May 2021]. (In Russ.).
14. Bekmuratova B. Processes for reducing water-based fuel and control of fuel emulsion combustion. *Byulleten' nauki i praktiki = Bulletin of Science and Practice*. 2021;7(1):300-304. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/63/19>.
15. Murko V. I., Chernikova O. P. Improvement of sustainability and efficiency of urban heating using coal-water slurry fuel. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2021;3:18-22. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-3-18-22>.
16. Vershinina K. Yu., Lyrshchikov S. Yu., Strizhak P. A. Ignition of fuel slurries based on waste products of coal processing and oil refining. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018;54(3):137-146. <https://doi.org/10.15372/FGV20180316>.
17. Nakoryakov V. E., Strizhak P. A., Glushkov D. O., Syrodoj S. V. Initiation of organic coal-water fuel droplet burning in a vortex combustion chamber. *Doklady Akademii nauk*. 2017;473(6):646-649. <https://doi.org/10.7868/S0869565217120040>.
18. Mchale E. T. Coal-water fuel combustion. *Symposium (International) on Combustion*. 1988;21(1):159-171. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(88\)80243-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80243-1).
19. Shadrin E. Yu., Anufriev I. S., Sharypov O. V. Atomization and combustion of coal-water slurry fuel sprayed by a pneumatic nozzle. *Prikladnaya mehanika i tekhnicheskaya fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2021;62(3):165-171. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/PMTF20210316>.
20. Dafsari R. A., Lee Hyung Ju, Han Jeongsik, Park Dong-Chang, Lee Jeekeun. Viscosity effect on the pressure swirl atomization of an alternative aviation fuel. *Fuel*. 2019;240:179-191. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.132>.
21. Minakov A. V., Shebeleva A. A., Strizhak P. A., Chernetskiy M. Yu., Volkov R. S. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals. *Fuel*. 2019;254:115606. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.014>.
22. Vershinina K. Yu., Lyrshchikov S. Yu., Strizhak P. A. Ignition of fuel slurries based on waste products of coal processing and oil refining. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2018;54(3):376-384.
23. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemi-

cals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*. 2021;218:106864. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106864>.

24. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*. 2021;230:120900. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120900>.

25. Han Han, Wang Pengfei, Li Yongjun, Liu Ronghua, Tian Chang. Effect of water supply pressure on atomization characteristics and dust-reduction efficiency of internal mixing air atomizing nozzle. *Advanced Powder Technology*. 2020;31(1):252-268. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.10.017>.

26. Roh Nam-Sun, Shin Dae-Hyun, Kim Dong-Chan, Kim Jong-Duk. Rheological behaviour of coal-water mixtures. 2. Effect of surfactants and temperature. *Fuel*. 1995;74(9):1313-1318. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00085-J](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00085-J).

27. Alekseenko S. V., Abdurakipov S. S., Hrebtov M. Y., Tokarev M. P., Markovich D. M. Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: a tomographic PIV study. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2018;70:363-379. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.12.009>.

28. Alekseenko S. V., Bilsky A. V., Dulin V. M., Markovich D. M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007;28(6):1340-1359. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.

29. Daviault S. G., Ramadan O. B., Matida E. A., Hughes P. M., Hughes R. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin

fluid atomizer. *Fuel*. 2012;98:183-193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.042>.

30. Pastor J. V., Arrègle J., Palomares A. Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test. *Applied Optics*. 2001;40(17):2876-2885. <https://doi.org/10.1364/AO.40.002876>.

31. Delacourt E., Desmet B., Besson B. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques. *Fuel*. 2005;84(7-8):859-867. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.12.003>.

32. Morgan R., Wray J., Kennaird D. A., Crua C., Heikal M. R. The influence of injector parameters on the formation and break-up of a diesel spray. *Journal of Engines*. 2001;110(3):389-399. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0529>.

33. Hang J., Bae C., Lee K. O. Initial development of non-evaporating diesel sprays in common-rail injection systems. *International Journal of Engine Research*. 2003;4(4):283-298. <https://doi.org/10.1243/146808703322743895>.

34. Wang Pengfei, Zhang Kui, Liu Ronghua. Influence of air supply pressure on atomization characteristics and dust-suppression efficiency of internal-mixing air-assisted atomizing nozzle. *Powder Technology*. 2019;355:393-407. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.040>.

35. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of the influence of the liquid drop size and velocity on the parameters of drop deformation in air. *Technical Physics Scientific Journal*. 2015;60(8):1119-1125.

36. Alekseenko S. V., Mal'cev L. I., Kravchenko I. V., Kravchenko A. I. *Pneumatic nozzle (options)*. Patent RF, no. 2523816; 2014. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гвоздяков Дмитрий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник Лаборатории
катализа и преобразования углеродсодержащих
материалов с получением полезных продуктов,
Кузбасский государственный технический
университет им. Т. Ф. Горбачева,
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия

Зенков Андрей Викторович,
кандидат технических наук,
ассистент НОЦ И. Н. Бутакова,
Инженерная школа энергетики,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy V. Gvozdyakov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Laboratory of
Catalysis and Transformation of Carbon-containing
Materials and Useful Products Obtaining,
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennyya St., Kemerovo 650000, Russia

Andrey V. Zenkov,
Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor of the Butakov Research Centre,
Engineering,
School of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Губин Владимир Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент НОЦ И. Н. Бутакова,
Инженерная школа энергетики,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Калтаев Альберт Жанатович,
инженер НИЦ «Экоэнергетика 4.0»,
Инженерная школа энергетики,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Марышева Яна Владимировна,
инженер НИЦ «Экоэнергетика 4.0»,
Инженерная школа энергетики,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.09.2021; одобрена после рецензирования 13.10.2021; принята к публикации 28.10.2021.

Vladimir E. Gubin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Butakov Research Center,
School of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Albert Zh. Kaltaev,
Engineer of Ecoenergy 4.0 Research Center,
School of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Yana V. Marysheva,
Engineer of Ecoenergy 4.0 Research Center,
School of Energy and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 24.09.2021; approved after reviewing 13.10.2021; accepted for publication 28.10.2021.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.31

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>

Многокритериальный подход к выбору площадок для размещения солнечно-дизельных систем генерации

Владимир Анатольевич Тремясов¹, Ольга Анатольевна Григорьева²,
Кара-Кыс Вадимовна Кенден^{3✉}

^{1,2} Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³ Тувинский государственный университет, Кызыл, Россия

¹ emf_tva@mail.ru

² Grigorieva.OO@mail.ru

³ kuca08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0975-3303>

Аннотация. Цель – разработка методики принятия решения по выбору площадки для размещения солнечно-дизельных систем генерации. При выборе площадки для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации использовалась процедура многокритериальной оценки эффективности вариантов площадки. Выбор площадки для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации с применением многокритериального подхода осуществлялся на примере с. Кунгуртут Республики Тыва. После анализа территории вокруг села были выбраны четыре варианта площадок для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации. В качестве критериев выбраны удобство монтажа и обслуживания солнечно-дизельной системы генерации, рельеф местности и качество грунта, удобство компоновки фотоэлектрического преобразователя, воздействие солнечно-дизельной системы генерации на окружающую среду, возможности дальнейшего расширения системы и потенциал ориентации фотоэлектрического преобразователя. Для оценки значимости коэффициента конкордации определено значение квантили распределения равное 16,2. Табличное значение коэффициента конкордации равно 11,1 – для числа степеней свободы 5 и уровня значимости равного 0,05. Поскольку значение квантили распределения больше табличного значения, то с достоверностью 95% можно утверждать, что коэффициент конкордации является значимым и имеет место согласованности мнений экспертов. В результате ранжирования вариантов площадок экспертами получены относительные оценки эффективности критериальных свойств; по формулам линейного преобразования выполнен перевод численных показателей в относительные оценки. Для среднеарифметической и гармонической форм свертки рассчитаны многокритериальные оценки эффективности вариантов. Анализ результатов сравнения вариантов площадок для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации позволил выбрать второй вариант площадки для с. Кунгуртут (данный вариант имеет наибольшие значения многокритериальной оценки). Разработана методика принятия решений при выборе площадки для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок, позволяющая учитывать комплекс технико-экономических, климатических и экологических критериев.

Ключевые слова: выбор площадки, критериальные свойства, многокритериальная оценка, солнечно-дизельная система генерации, экспертный метод, интенсивность солнечного излучения

Для цитирования: Тремясов В. А., Григорьева О. А., Кенден К. В. Многокритериальный подход к выбору площадок для размещения солнечно-дизельных систем генерации // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 601–610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.

POWER ENGINEERING

Original article

Multi-criteria approach to selecting sites for solar-diesel hybrid systems

Vladimir A. Tremyasov¹, Olga A. Grigorieva², Kara-Kys V. Kenden^{3✉}

^{1,2} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ Tuvan State University, Kyzyl, Russia

© Тремясов В. А., Григорьева О. А., Кенден К. В., 2021

<https://vestirgtu.elpub.ru>

¹ emf_tva@mail.ru

² Grigorieva.OO@mail.ru

³ kuca08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0975-3303>

Abstract. The paper aims to develop a site selection procedure for solar-diesel hybrid systems using a multi-criteria performance analysis of site options. The site selection process using this multi-criteria approach was carried out on the example of Kungurtug rural settlement (Tyva Republic). The area surrounding this settlement was analyzed, revealing four possible sites for a solar-diesel system. For evaluating the performance of these site options, the following criteria were adopted: ease of installation and maintenance of the solar-diesel hybrid system; surface topography and soil quality; convenience of the photovoltaic cell layout; environmental impact of the solar-diesel hybrid system; opportunities for further expansion of the system; orientation potential of the photovoltaic cell. In order to assess the significance of the concordance coefficient, the distribution quantile was determined, amounting to 16.2. For 5 degrees of freedom and a significance level of 0.05, the table value of the concordance coefficient amounted to 16.2. Since the distribution quantile is greater than the table value, the concordance coefficient can be considered significant (95% confidence level), indicating agreement between expert opinions. Experts ranked the site options to obtain relative performance estimates for the criteria; numeric indicators were converted into the relative estimates using linear transformation formulas. The multi-criteria performance estimates of the possible options were calculated for arithmetic mean and harmonic convolutions. After comparing the site options for the solar-diesel system, the second variant characterized by the highest criterion scores was selected for Kungurtug settlement. As a result, a site selection procedure for the elements of solar-diesel hybrid systems was developed using the theory of multi-criteria optimization and the method of expert evaluations, allowing a set of technical, economic, climatic, and environmental criteria to be taken into account.

Keywords: site selection, criterion properties, multi-criteria assessment, solar-diesel generation system, expert method, solar radiation intensity

For citation: Tremyasov V. A., Grigorieva O. A., Kenden K. V. Multi-criteria approach to selecting sites for solar-diesel hybrid systems. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):601-610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.

ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения снижения общих затрат на строительство солнечно-дизельной системы генерации (СДСГ) и повышения эффективности использования ресурсов солнечной энергии выбор площадки для размещения элементов СДСГ является важным стратегическим решением на этапе строительства и эксплуатации СДСГ. Поэтому процесс выбора площадки для размещения элементов СДСГ состоит в рассмотрении потенциальных противоречивых критериев и анализе нескольких возможных вариантов. При этом, учитывая важность решения данного вопроса, лица, принимающие решения (ЛПР), должны выбрать не только подходящую для нынешних условий площадку, но и достаточно гибкую в процессе модернизации СДСГ [1–10].

Таким образом, целью настоящей работы является разработка методики выбора площадки для размещения элементов СДСГ с использованием многокритериального подхода, основанного на экспертной оценке [11, 12].

МЕТОДИКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ПЛОЩАДОК РАЗМЕЩЕНИЯ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА

Многокритериальная оценка эффективности вариантов площадки СДСГ на основе экспертных оценок включает несколько этапов:

Выбор ЛПР. При сравнении вариантов площадок число ЛПР выбирается равным или больше числа критериальных свойств (КС). Ориентировочное число ЛПР может быть от 5 до 10 человек.

Формулировка и выбор КС. Экспертным составом формируется перечень КС [13–14]. В зависимости от уровня знаний экспертного состава, объединяя КС по смыслу, можно добиться некоторого ограничения их числа. Допускается от 3 до 7 КС.

Определение весомостей КС. Для определения весомостей КС применяют, как правило, метод непосредственной оценки,

метод ранговой корреляции, метод последовательных сопоставлений, метод модификации частичного и парного сравнения и т. д. [15, 16]. Однако на ранних стадиях проектирования энергообъектов наиболее часто используется метод ранговой корреляции [17].

ЛПР присваивают оценочный ранг a_i каждому КС, соответствующему месту, занимаемому КС в порядке убывания его весомости (важности). КС присваивается ранг, отвечающий среднему из суммы соответствующих мест, если невозможно различить несколько КС по их важности [15, 16].

Весомость: v_{ij} -го КС определяется:

$$v_i = w_i (\sum_{i=1}^n w_i)^{-1}; \quad (1)$$

$$w_i = 1 - A_i(nN)^{-1} + n^{-1}, \quad (2)$$

где N – количество ЛПР; n – количество КС; A_i – сумма рангов i -го КС.

$$A_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}, \quad (3)$$

где a_{ik} – ранг, присвоенный k -м ЛПР.

Степень согласованности мнений ЛПР с ранжированием совокупности КС характеризуется коэффициентом конкордации C [18].

При отсутствии связанных рангов коэффициент конкордации

$$C = \frac{12\Delta A_{\Sigma}}{N^2(n^3 - n)};$$

$$\Delta A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\Delta A_i)^2; \quad (4)$$

$$\Delta A_i = A_i - A_{cp};$$

$$\Delta A_{cp} = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N a_{ik}}.$$

При наличии связанных рангов коэффициент конкордации

$$C = \frac{\Delta A_{\Sigma}}{\frac{1}{12}N^2(n^3 - n) - N \sum_{k=1}^N T_k}, \quad (5)$$

где $T_k = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^m (t_k^3 - t_k)$ – показатель связан-

ных рангов у k -го ЛПР; m – количество связанных рангов; t_k – количество повторений каждого ранга в k -м ряду; $m < n$.

Для оценки значимости коэффициента конкордации вычисляется квантиль распределения χ_C^2 .

При отсутствии связанных рангов

$$\chi_C^2 = \frac{A_{\Sigma}}{\frac{1}{12}Nn(n+1)}. \quad (6)$$

При наличии связанных рангов

$$\chi_C^2 = \frac{\Delta A_{\Sigma}}{\frac{1}{12}Nn(n+1) - \frac{1}{(n-1)}N \sum_{k=1}^n T_k}. \quad (7)$$

Связи между ранжированием объектов у различных ЛПР не существует при $C = 0$, соответственно, все ЛПР одинаково ранжируют объект при $C = 1$ [16, 17].

При числе степеней свободы r и уровне значимости α , как правило, $\alpha = 0,05$, $r = n - 1$, производится расчет квантиля распределения. Коэффициент согласия считается значимым, и мнения ЛПР не расходятся при $\chi_C^2 \geq \chi_{табл}^2$ [18].

Относительные оценки эффективности КС e_{ij} при отсутствии численных показателей y_i получаются ранжированием вариантов площадки каждым ЛПР.

Сумма рангов

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N b_{ijk}. \quad (8)$$

Эффективность e_{ij} КС – для каждого варианта:

$$e_{ij} = 1 - B_{ij}(mN)^{-1} + m^{-1}, \quad (9)$$

где m – количество вариантов.

Расчет эффективности вариантов по критериальным свойствам. Для расчета ЛПР необходимо выбрать способы оценок показателей, которым необходимо подобрать численный показатель [15].

Для определения оценок можно использовать экономические и технические расчеты, а в случаях, когда по какому-либо КС не удается подобрать численный показатель –

применить индивидуальный или коллективный опыт ЛПР. Переход численных оценок КС в относительные оценки y_i в диапазоне $[0;1]$ может быть осуществлен с помощью линейного преобразования [18]:

$$\begin{aligned} & 0 \text{ при } y_i \leq y_i^H; \\ & e_i = \frac{y_i - y_i^H}{y_i^B - y_i^H} \text{ при } y_i^H \leq y_i \leq y_i^B; \\ & 1 \text{ при } y_i \geq y_i^B \\ & \text{или} \\ & 1 \text{ при } y_i \leq y_i^H; \\ & e_i = \frac{y_i^B - y_i}{y_i^B - y_i^H} \text{ при } y_i^H \leq y_i \leq y_i^B; \\ & 0 \text{ при } y_i \geq y_i^B. \end{aligned} \quad (10)$$

Диапазон возможных значений показателей в одном из четырех видов $[0, y_i^B], [y_i^H, y_i^B], [y_i^H, \infty], [0, \infty]$ задается верхними и нижними границами и вводится функциональное преобразование, приводящее отрезок $[y_i^H, y_i^B]$ к $[0;1]$. Диапазон изменений КС устанавливается на экспертной основе.

Комплексная оценка эффективности вариантов решений заключается в свертке всех КС в единый комплексный критерий эффективности.

На сегодняшний день в квалиметрии разработано несколько десятков форм свертки E_k^* для целевой функции [16]. Средняя арифметическая линейная форма используется в способах оценок в интервале $[0;1]$. При этом весовости КС не должны зависеть от оценок степени достижения частных целей для любых сравниваемых вариантов или объектов [19]:

$$E_A^* = \sum_{i=1}^n v_i e_i \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (11)$$

Мультипликативная средняя геометрическая форма свертки дополнена коэффициентом «вето» для того, чтобы она обращалась в нуль при нижнем уровне одного из КС:

$$E_M^* = \prod_{i=1}^n (e_i)^{v_i} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (12)$$

Средняя гармоническая форма свертки:

$$E_H^* = \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{e_i} \right)^{-1} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (13)$$

Полученное значение целевой функции E_k^* для каждого варианта размещения площадки СДСГ представляет комплексную оценку его качества и дает возможность упорядочить варианты по их эффективности. Неэффективному варианту площадки соответствует значение $E_k^* = 0$, а идеальному – $E_k^* = 1$. Требуемое нормирование диапазона E_k^* должно обеспечиваться структурой целевой функции и соответствующим масштабированием весовых коэффициентов [18].

В качестве оптимального варианта площадки для размещения элементов СДСГ считается тот, у которого наибольшая оценка эффективности по выражениям (11)–(13).

Погрешность оценок v_i (в случае определения их группой экспертов) вычисляется по множеству указанных экспертами значений как среднеквадратическое отклонение от среднего. Погрешности оценок e_i определяются погрешностями измерения показателей y_i и распределением вероятностей этих погрешностей. При определении e_i экспертным путем погрешности этих оценок вычисляют аналогично погрешностям оценок v_i .

При экспертной оценке v_i и e_i их среднеквадратическая погрешность снижается пропорционально корню квадратному из числа экспертов. Если считать значения v_i и e_i случайными величинами с известными среднеквадратическими отклонениями σ_{e_i} и σ_{v_i} и средними значениями $\bar{e}_i$ и $\bar{v}_i$, то среднеквадратическая погрешность целевой функции может быть определена в случае отсутствия корреляции между v_i и e_i как

$$\sigma_{E^*} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial E^*}{\partial e_i} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + \left(\frac{\partial E^*}{\partial v_i} \right)^2 \sigma_{v_i}^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (14)$$

где черта над частной производной $\partial E^* / \partial e_i$ означает, что производная вычисляется в точке математического ожидания e_i , $\partial E^* / \partial v_i$ –

в точке математического ожидания v_i , соответственно.

Из формулы (14) для средней арифметической формы целевой функции (11) получим:

$$\sigma_{E^*}^{ap} = \left\{ \sum_{i=1}^n [v_i^{-2} \sigma_{e_i}^2 + e_i^{-2} \sigma_{v_i}^2] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Для средней геометрической формы:

$$\sigma_{E^*}^{geom} = E_{geom}^* \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\bar{v}_i}{\bar{e}_i} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + (\ln \bar{e}_i)^2 \sigma_{v_i}^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Для средней гармонической формы:

$$\sigma_{E^*}^{гарм} = (E_{geom}^*)^2 \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\bar{v}_i}{\bar{e}_i} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + \frac{\sigma_{v_i}^2}{\bar{e}_i^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Применение формул (15)–(17) на практике показало, что ошибки σ_{E^*} средней гармонической формы целевой функции значительно меньше, чем у мультипликативной и арифметической форм при тех же самых ошибках в оценках v_i и e_i . Таким образом, средняя гармоническая форма (17) обладает большей разрешающей способностью при сравнении близких по своим свойствам объектов с невысокой точностью оценок v_i и e_i [14].

Кроме того, средняя гармоническая форма весьма резко занижает оценки целевой функции у вариантов, имеющих низкие показатели по отдельным свойствам [16, 17].

Таким образом, форму (15) можно рекомендовать в качестве показателя эффективности за простоту вычислений и наглядность. Форма (16) также проста для вычислений, совместное применение (15) и (16) позволяет уверенно различать большое число вариантов, включая и те, у которых КС получили одинаковые оценки e_{ik} [19].

ВЫБОР ПЛОЩАДКИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ СЕЛА КУНГУРТУГ В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА

С помощью методики оценки интенсивности солнечного излучения (СИ) на горизонтальную поверхность, описанной в [19, 20], определены среднегодовые значения интенсивности СИ на горизонтальную поверхность для изолированных районов Республики Тыва. По результатам расчета, с учетом физико-географических особенностей рельефа местности, произведено районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам (рис. 1).

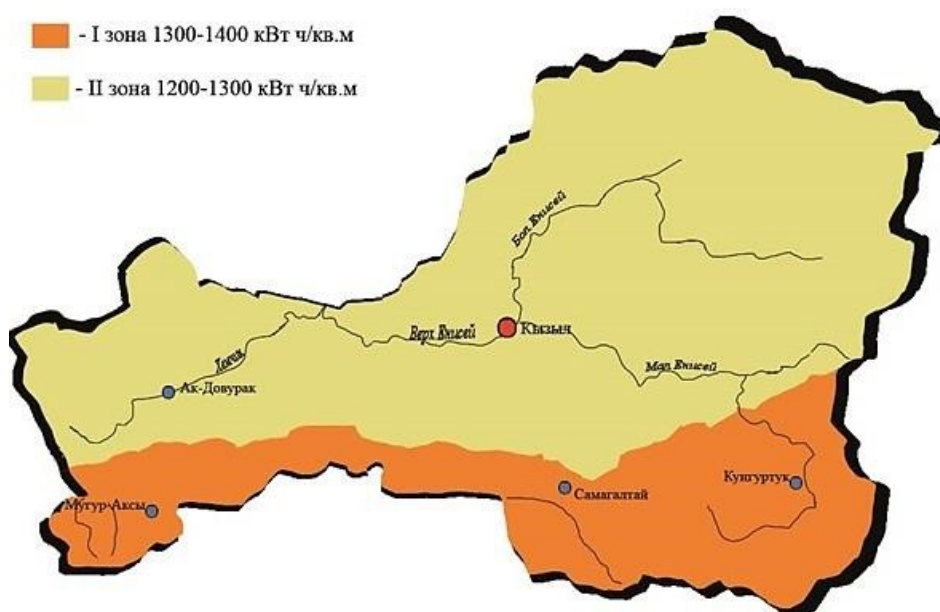


Рис. 1. Районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам
Fig. 1. Solar zoning of the Tyva Republic

По полученным значениям интенсивности СИ на горизонтальную поверхность Республика Тыва характеризуется двумя солнечными зонами [19, 20]:

I солнечная зона со значениями интенсивности СИ на горизонтальную поверхность, равными 1300...1400 кВт·ч/м² в год. Она расположена в основном в южной части республики и характеризуется отсутствием леса, сочетанием тундр и лугов. В зону входят Эрзинский, Монгун-Тайгинский, Тере-Хольский районы.

II солнечная зона достаточно благоприятная для использования солнечной энергии, интенсивность СИ на горизонтальную поверхность составляет 1200...1300 кВт·ч/м² в год, расположена в центральной и северной частях республики. К этой зоне относятся Каа-Хемский, Пий-Хемский, Тоджинский районы.

По результатам районирования Республики Тыва по солнечным зонам следует отметить, что для первоочередного размещения СДСГ выбрано изолированное с. Кунгуртуг в Тере-Хольском районе, расположенное в I солнечной зоне. Поэтому выбор площадки

для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации (СДГУ) с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок произведен на примере этого села. Анализ территории вокруг села позволил предложить четыре варианта размещения площадок, представленных на рис. 2:

Вариант № 1 – площадка без лесного массива, расположенная в северной части села и требующая предварительного выравнивания рельефа, с ограниченной возможностью дальнейшего расширения СДСГ.

Вариант № 2 – достаточно ровная площадка без лесного массива с возможностью дальнейшего расширения СДСГ, расположенная в западной части села.

Вариант № 3 – площадка, расположенная в восточной части села и требующая предварительного выравнивания рельефа местности, с возможностью дальнейшего расширения СДСГ при условии вырубке деревьев.

Вариант № 4 – ровная площадка с небольшим лесным массивом, с возможностью дальнейшего расширения СДСГ, расположенная в южной части села.



Рис. 2. Общий вид с. Кунгуртуг со спутника с вариантами размещения площадок для солнечно-дизельной системы генерации

Fig. 2. Satellite general view of Kungurtug village with location options for solar-diesel generation system sites

Таблица 1. Матрица рангов оценки весомостей критериальных свойств [18]
Table 1. Matrix of evaluation ranks of criterion properties strength [18]

Эксперт	Критериальные свойства и их ранги					
	КС 1	КС 2	КС 3	КС 4	КС 5	КС 6
1	1	4,5	4,5	6	3	2
2	1,5	3	1,5	4	6	5
3	2,5	2,5	4	5	6	1
4	2	3	4	6	5	1
5	1	3	2	6	4	5
6	2	4	5	6	3	1
Сумма рангов A_i	10	20	21	33	27	15
v_i	0,255	0,175	0,167	0,070	0,118	0,215
A_{cp}	21					
ΔA_i	-11	-1	0	12	6	-6
$(\Delta A_i)^2$	121	1	0	144	36	36
ΔA_{Σ}	338					

КС – критериальные свойства.

Для выбора варианта площадки для размещения элементов СДСГ на основе обобщения имеющегося опыта и опроса шести компетентных экспертов был определен следующий перечень КС, максимум:

- удобства монтажа и обслуживания СДСГ;
- благоприятного рельефа местности и качества грунта;
- удобства компоновки ФЭП;
- воздействия на окружающую среду;
- возможности дальнейшего расширения СДСГ;
- возможности ориентации ФЭП преимущественно на юг и отсутствия высоких препятствий для СИ.

В табл. 1 представлены оценки весомостей КС v_i , полученные методом ранговой корреляции, и матрица оценочных рангов КС, данных шестью экспертами.

Коэффициент конкордации (согласованности) мнений экспертов $C = 0,54$ подтвердил согласованность мнений экспертов с ранжированием КС. Для оценки значимости коэффициента конкордации определено значение квантили распределения $\chi^2_C = 16,2$ [14]. При числе степеней свободы 5 и уровне значимости $\alpha = 0,05$ определено табличное значение квантили распределения $\chi^2_{C\text{табл}} = 11,1$. Поскольку $\chi^2_C \geq \chi^2_{C\text{табл}}$, то с достоверностью 95% можно утверждать, что коэффициент согласия значим, и имеет место согласованность

экспертов.

В результате ранжирования вариантов площадок каждым экспертом получены относительные оценки эффективности первого КС: $e_{11} = 0,812$; $e_{12} = 0,417$; $e_{13} = 0,687$; $e_{14} = 0,583$ (табл. 2).

Таблица 2. Матрица рангов для первого критериального свойства**Table 2.** Matrix of ranks for the first criterion property

Эксперт	Вариант площадки			
	1	2	3	4
1	1	3	4	2
2	1	4	2	3
3	2,5	2,5	2,5	2,5
4	4	3	1	2
5	1	3,5	2	3,5
6	1	4	2	3

Экспертным путем получены относительные оценки эффективности второго, четвертого и шестого КС. Используя численные оценки длин силовых кабелей, соединяющих ФЭП с инвертором и величины свободных площадей для перспективного расширения, получили относительные оценки эффективности третьего и пятого КС у каждого варианта СДГУ. По формулам линейного преобразования выполнен переход численных показателей в относительные оценки в диапазоне $[0, 1]$.

Результаты многокритериальных оценок эффективности вариантов, рассчитанные для среднеарифметической и гармонической форм свертки, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Многокритериальная оценка эффективности вариантов площадок для размещения элементов солнечно-дизельной системы генерации с. Кунгуртут

Table 3. Multi-criteria assessment of effectiveness of site options for solar-diesel generation system elements location in the village of Kungurtug

№ варианта	Оценки весомостей критериальных свойств						Форма свертки	
	$u_1 = 0,255$	$u_2 = 0,175$	$u_3 = 0,167$	$u_4 = 0,07$	$u_5 = 0,118$	$u_6 = 0,215$		
	Оценка частных критериев e_{ij}						$F_{срА}^*$	$F_{Г}^*$
1	0,812	0,687	0,5	0,667	0	0,562	0,578	0
2	0,417	0,812	1	0,729	0,5	0,812	0,700	0,628
3	0,687	0,271	1	0,292	0	0,25	0,464	0
4	0,583	0,729	0	0,812	1	0,625	0,585	0

Анализ результатов сравнения вариантов площадок для размещения элементов СДГУ по многокритериальной оценке, эффективности позволяет выбрать 2-й вариант площадки для с. Кунгуртут, у которого наибольшие значения многокритериальной оценки $F_{срА}^*$ и $F_{Г}^*$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика принятия решений при выборе площадки для размещения эле-

ментов СДГУ с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок, позволяющая учитывать комплекс технико-экономических, климатических и экологических критериев. Произведен выбор площадки для размещения элементов СДГУ на основе многокритериального подхода с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок на примере с. Кунгуртут.

Список источников

1. Lee Amy H. I., Kang He-Yau, Liou You-Jyun. A Hybrid multiple-criteria decision-making approach for photovoltaic solar plant location selection // Sustainability. 2017. Vol. 9. No. 2. P. 184. <https://doi.org/10.3390/su9020184>.
2. Akkas O. P., Erten M. Ya., Cam E., Inanc N. Optimal site selection for a solar power plant in the central Anatolian region of Turkey // International Journal of Photoenergy. 2017. Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7452715>.
3. Bakhtavar E., Lotfian R. Applying an integrated fuzzy gray MCDM approach: a case study on mineral processing plant site selection // International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2017. Vol. 51. P. 177–183. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2017.232091.594669>.
4. Ghasempoura R., Nazari M. A., Ebrahimi M., Ahmadi M. H., Hadiyanto H. Multi-criteria decision making (MCDM) approach for selecting solar plants site and technology: a review // International Journal of Renewable Energy Development. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 15–25. <https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.15-25>.
5. Saracoglu B. O., Ohunakin O. S., Adelekan D. S., Gill J., Atiba O. E., Okokpuje I. P., Atayero A. A. A framework for selecting the location of very large photovoltaic solar power plants on a global/supergrid // Energy Reports. 2018. Vol. 4. P. 586–602. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.09.002>.
6. Yousefi H., Hafeznia H., Yousefi-Sahzabi A. Spatial site selection for solar power plants using a GIS-based boolean-fuzzy logic model: a case study of Markazi province, Iran // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 7. P. 1648. <https://doi.org/10.3390/en11071648>.
7. Артемьев А. Ю. Методика принятия решений при выборе района для размещения ВЭС с учетом неопределённости в отношении критериальных оценок // Системные исследования в энергетике: тр. молодых ученых Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Вып. 46. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2016. С. 98–105.
8. Панкратьев П. С. Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электрообеспечением в условиях многокритериальности, с учетом неточно выраженных предпочтений лиц, принимающих решение // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 320–334. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-320-334>.
9. Шакиров В. А., Панкратьев П. С. Выбор пункта строительства электростанции в условиях риска методом анализа иерархии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4. С. 141–147.
10. Воропай Н. И., Подковальников С. В., Труфанов В. В. [и др.]. Обоснование развития электроэнергетических систем: методология, модели, методы, их использование. Новосибирск: Наука, 2015. 448 с.
11. Сайфулина К. Э., Козунова Г. Л., Медведев В. А., Рытикова А. М., Чернышев Б. В. Принятие решения в условиях неопределенности: стратегии исследования и использования // Современная зарубежная психология. 2020. Т. 9. № 2. С. 93–106. <https://doi.org/10.17759/jmfp.2020090208>.

12. Акоф Р. Л., Сасиени М. В. Основы исследования операций / пер. с англ. В. Я. Алтаева; под ред. И. А. Ушакова. М.: Изд-во «Мир», 1971. 534 с.

13. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. М.: Изд-во «Статистика», 1974. 160 с.

14. Хорошев Н. И., Петроченков А. Б., Ромодин А. В. Экспертный метод оценки надежности электротехнического оборудования при принятии управленческих решений // Вестник Ижевского государственного технического университета им. М. Т. Калашникова. 2009. № 4. С. 161–164.

15. Азгалъдов Г. Г., Райхман Э. П. О квалиметрии. М.: Изд-во стандартов. 1973. 172 с.

16. Кини Р. Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / пер. с англ. М.: Изд-во «Радио и связь», 1981. 560 с.

17. Гук Ю. Б., Долгов П. П., Окорочков В. Р. Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике / ред. В. Р. Окорочкова, Д. С. Щавелева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. 176 с.

18. Бобров А. В., Тремясов В. А. Ветроэнергетические комплексы в децентрализованном электроснабжении: монография. Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. 216 с.

19. Тремясов В. А., Кенден К. В. Фотоэлектрические и гидроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография. Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. 208 с.

20. Кенден К. В. Ресурсы гелиоэнергетики в Республике Тыва // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 4. С. 7–13. <https://doi.org/10.5862/JEST.231.1>.

References

1. Lee Amy H. I., Kang He-Yau, Liou You-Jyun. A hybrid multiple-criteria decision-making approach for photovoltaic solar plant location selection. *Sustainability*. 2017;9(2):184. <https://doi.org/10.3390/su9020184>.

2. Akkas O. P., Erten M. Ya., Cam E., Inanc N. Optimal site selection for a solar power plant in the central Anatolian region of Turkey. *International Journal of Photoenergy*. 2017;2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7452715>.

3. Bakhtavar E., Lotfian R. Applying an integrated fuzzy gray MCDM approach: a case study on mineral processing plant site selection. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2017;51:177-183. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2017.232091.594669>.

4. Ghasempoura R., Nazari M. A., Ebrahimi M., Ahmadi M. H., Hadiyanto H. Multi-criteria decision making (MCDM) approach for selecting solar plants site and technology: a review. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2019;8(1):15-25. <https://doi.org/10.14710/ijred.8.1.15-25>.

5. Saracoglu B. O., Ohunakin O. S., Adelekan D. S., Gill J., Atiba O. E., Okokpuje I. P., Atayero A. A. A framework for selecting the location of very large photovoltaic solar power plants on a global/supergrid. *Energy Reports*. 2018;4:586-602. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.09.002>.

6. Yousefi H., Hafeznia H., Yousefi-Sahzabi A. Spatial site selection for solar power plants using a GIS-based Boolean-fuzzy logic model: a case study of Markazi province, Iran. *Energies*. 2018;11(7):1648. <https://doi.org/10.3390/en11071648>.

7. Artem'ev A. Yu. Decision-making methodology when choosing wind farm location area considering uncertainty of criterion assessments. In: *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodyh uchenykh Instituta sistem energetiki imeni L. A. Melent'eva Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk = System studies in power engineering: proceedings of young scientists of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. Iss. 46. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Acad-

emy of Sciences; 2016, p. 98-105. (In Russ.).

8. Pankratiev P. S. Thermal power plant location in the region with decentralized power supply under multiattribute conditions considering imprecisely expressed preferences of decision makers. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(2):320-334. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-320-334>.

9. Shakirov V. A., Pankrat'ev P. S. Selection of power plant construction site in conditions of risk using the hierarchy analysis method. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2014;4:141-147. (In Russ.).

10. Voropaj N. I., Podkova'nikov S. V., Trufanov V. V., et al. *Rationale for electric power system development: methodology, models, methods, their use*. Novosibirsk: Nauka; 2015, 448 p. (In Russ.).

11. Saifulina K. E., Kozunova G. L., Medvedev V. A., Rytikova A. M., Chernyshev B. V. Decision making under uncertainty: strategies of research and use. *Sovremennaya zarubezhnaya psihologiya = Journal of Modern Foreign Psychology*. 2020;9(2):93-106. <https://doi.org/10.17759/jmfp.2020090208>.

12. Ackoff R. L., Sasieni M. W. Fundamentals of operations research, 1971, 534 p. (Russ. ed.: *Osnovy issledovaniya operacij*. Moscow: Mir; 1971, 534 p.)

13. Beshelev S. D., Gurvich F. G. *Mathematical and statistical methods of expert assessments*. Moscow: Statistika; 1974, 160 p. (In Russ.).

14. Khoroshev N. I., Petrochenkov A. B., Romodin A. V. Expert reliability estimation method of the electrotechnical equipment at administrative decision-making. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M. T. Kalashnikova = Bulletin of Kalashnikov ISTU*. 2009;4:161-164. (In Russ.).

15. Azgal'dov G. G., Rajhman E. P. *About qualimetry*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1973, 172 p. (In Russ.).

16. Keeney R. L., Rife H. Decision making under many criteria: preferences and substitutions, 1981, 560 p.

(Russ. ed.: *Prinyatie reshenij pri mnogih kriteriyah: predpochteniya i zameshcheniya*. Moscow: Radio i svyaz'; 1981, 560 p.)

17. Guk Yu. B., Dolgov P. P., Okorokov V. R. *Integrated analysis of effectiveness of engineering solutions in power engineering* / ed. Okorokova V. R., Shchavaleva D. S. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie; 1985, 176 p. (In Russ.).

18. Bobrov A. V., Tremyasov V. A. *Wind diesel complexes in decentralized power supply*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2012, 216 p. (In Russ.).

19. Tremyasov V. A., Kenden K. V. *Photovoltaic and hydropower installations in autonomous power supply systems: Monograph*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, 208 p. (In Russ.).

20. Kenden K. V. Solar energy resources in the Tyva Republic. *Nauchno-tehnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta = St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2015;4:7-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.5862/JEST.231.1>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тремясов Владимир Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электрические станции
и электроэнергетические системы»,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия

Григорьева Ольга Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры стандартизации, метрологии
и управления качеством,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия

Кенден Кара-Кыс Вадимовна,
старший преподаватель кафедры
общинженерных дисциплин,
Тувинский государственный университет,
667000, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.05.2021; одобрена после рецензирования 23.08.2021; принята к публикации 25.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Tremyasov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Power Plants
and Electric Power Systems,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia

Olga A. Grigorieva,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Standardization, Metrology and Quality Control,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia

Kara-Kys V. Kenden,
Senior Lecturer of the Department
of General Engineering Disciplines,
Tuvan State University,
36 Lenin St., Kyzyl 667000, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 13.05.2021; approved after reviewing 23.08.2021; accepted for publication 25.10.2021.



Научная статья

УДК 669.213.3:66.046.8

<http://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>

Реализация опыта цифровых автоматизированных систем управления электролитического рафинирования меди на предприятиях Вьетнама

Владимир Юрьевич Бажин^{1✉}, Денис Викторович Горленков²,
Хю Хоанг Нгуен³, Любовь Николаевна Никитина⁴

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

¹ bazhin-alfail@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

² denis.gorlenkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9632-6715>

³ huyhoangmta45@gmail.com

⁴ nikitina_ln@spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2603-8424>

Аннотация. Цель – разработка цифрового контроля и управления процессами электролитического рафинирования меди при решении вопросов повышения энергоэффективности. В качестве источника контроля технологического состояния электролитных ячеек предложено использовать сканирующие тепловизоры. При этом учитывался опыт работы систем автоматизации и контроля ОАО «Новгородский металлургический завод». Применялись математические методы исследований и стохастическая модель, разработанная на базе пакета MatLab. Данная модель используется на медеплавильном заводе Лаокай (Вьетнам). Предложен алгоритм, базирующийся на изменении значения температуры электролита в зависимости от степени нагрева катодного и анодного участков при дендритном замыкании, а также от времени нарушения процесса. Алгоритм разработан на языках программирования Visual BasicScript. Изменение степени нагрева участков замыкания фиксируется при помощи сканирующего тепловизора сразу же после изменения цвета поверхности катода. Установлена связь продолжительности времени короткого замыкания с количеством переходящего в осадок электролитной ячейки шлама. Шлам образуется после разрушения дендритного сращения и содержит благородные металлы. Разработанные мероприятия, наряду с переходом на цифровую обработку, необходимы для управляющего воздействия с учетом функциональных и кинетических зависимостей процесса рафинирования меди. Предлагаемые мероприятия и внедрение алгоритма контроля позволят внедрить системы удаленного доступа с элементами дополненной реальности при создании цифрового двойника, что позволит снизить удельный расход электроэнергии на 20–25% при уменьшении случаев замыканий электродов. Контроль состава и уровня электролита и шлама позволит снизить материальные потери и сохранить уровень концентрации благородных металлов в электролите. Для повышения качества управления автоматизацией электролитического производства катодной меди предложен ряд технических мероприятий, обеспечивающих ввод дополнительных точек контроля для расширения базы данных процесса. При этом снижается доля ручных периодических измерений технологических параметров.

Ключевые слова: автоматизация производства, цифровая трансформация, электролитическое рафинирование меди, катодная медь, информационные технологии

Для цитирования: Бажин В. Ю., Горленков Д. В., Нгуен Хю Хоанг, Никитина Л. Н. Реализация опыта цифровых автоматизированных систем управления электролитического рафинирования меди на предприятиях Вьетнама // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 611–622. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>.

Implementation of digital automated control systems at electrolytic copper refining plants in Vietnam

Vladimir Yu. Bazhin^{1✉}, Denis V. Gorlenkov², Huy H. Nguyen³, Lyubov N. Nikitina⁴

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹ bazhin-alfail@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

² denis.gorlenkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9632-6715>

³ huyhoangmta45@gmail.com

⁴ nikitina_ln@spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2603-8424>

Abstract. The work aims to develop digital control and management systems of copper electrolytic refining processes when addressing energy efficiency issues. Thermal imaging scanners can be used to monitor the process state of an electrolytic cell. In this regard, the experience in the automation and control systems of OJSC Novgorod Metallurgical Plant was considered. Mathematical research methods and a stochastic model developed in the MatLab software were used. This model was applied at the Lao Cai copper-smelting plant (Vietnam). The proposed algorithm is based on the temperature variation in electrolyte depending on the heating of cathode and anode sections during short circuits due to dendritic growth, as well as process disturbance time. The algorithm was developed using the Visual BasicScript programming languages. The temperature rise in short circuit areas was recorded using a thermal imaging scanner immediately after the colour change of the cathode surface. It was shown that the duration of a short circuit depends on the amount of sludge deposited in an electrolytic cell. The sludge formed following the destruction of intergrown dendrites contains precious metals. The developed measures, along with those of digitisation, are necessary for effective management, taking into account the functional and kinetic characteristics of the copper refining process. The proposed solutions and control algorithms will allow remote access systems with augmented reality elements when creating a digital twin. This will reduce the specific power consumption by 20–25% while decreasing the number of electrode short circuits. Controlling the composition and level of electrolyte and sludge will reduce material losses and maintain the concentration of noble metals in the electrolyte. To improve the control quality of automation during the electrolytic production of cathode copper, a number of technical measures were proposed that provide additional points of control to expand the process database. Furthermore, the proportion of manual periodic measurements of process parameters is reduced.

Keywords: production automation, digital transformation, electrolytic copper refining, cathode copper, information technologies

For citation: Bazhin V. Yu., Gorlenkov D. V., Nguyen Huu Hoang, Nikitina L. N. Implementation of digital automated control systems at electrolytic copper refining plants in Vietnam. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):611-622. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-611-622>.

ВВЕДЕНИЕ

Медь – важный металл практически для любой отрасли промышленности как в развитых, так и в развивающихся странах. По потреблению медь занимает третье место среди металлов после стали и алюминия. Благодаря хорошей электропроводности, теплопроводности, высокой прочности медь и медные сплавы широко используются в качестве электрических проводников в промышленном и гражданском электрооборудовании. Кроме того, медь и медные сплавы также широко используются в оборонной промышленности, машиностроении, строительстве и других областях.

Электролитическое рафинирование меди позволяет получить практически чистый про-

дукт и является завершающим переделом медного производства. Медь, полученная в результате огневого рафинирования, так называемая «черновая медь», содержит еще значительное количество примесей (1–3%), и поэтому подвергается электролитическому рафинированию, цель которого – получение меди достаточно высокой степени чистоты (от 99,7 до 99,99% Cu) и извлечение из нее благородных металлов и других ценных примесей (селен, теллур и т.д.)^{5–7} [1–5].

Из меди, полученной при огневом рафинировании, отливают аноды, представляющие собой медные плиты с ушками-электрододержателями, которыми аноды опираются на бортовые шины или борта ванны при их размещении в ванне, ширина ано-

дов обычно достигает примерно 700–900 мм, длина – 1000 мм, толщина – 30–50 мм. Масса анодов на разных заводах колеблется от 160 до 320 кг.

Аноды помещают в электролитную ванну, а между ними расположены катоды, представляющие собой тонкие чистые листы меди толщиной 0,4–0,8 мм, полученные в специальных матричных ваннах, где катодами служат листы из чистой полированной меди, нержавеющей стали или титана. Катодные основы должны быть длиннее и шире анодов на 20–40 мм.

Аноды и катоды погружают в ванны, которые наполняются водным раствором сульфата меди со свободной серной кислотой и подключают к источнику постоянного тока. При прохождении электрического тока анод растворяется, а на катоде выделяется чистая медь [6–9].

МЕДНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ВЬЕТНАМА

В рудах медь входит в состав таких минералов, как халькопирит (CuFeS_2), борнит (Cu_5FeS_4), халькозин (Cu_2S), бурнонит (CuPbSbS_3). Также экономическое значение для промышленной переработки имеют такие минералы, как малахит $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$, азурит $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, куприт Cu_2O [10–13].

В странах азиатско-тихоокеанского региона большая часть медной руды имеет содержание меди около 2%, что представляет некоторые трудности для получения меди непосредственно из руд. Производство меди играет важную роль в экономике многих стран этого региона, поэтому решение вопросов добычи и дальнейшего получения меди представляет собой стратегическое значение.

На примере медных руд Вьетнама можно отметить, что в данном регионе медная руда относится к четырем различным типам происхождения: магматическому, гидротермаль-

ному, осадочному и метаморфическому.

Медные руды разбросаны по таким провинциям, как Лаокай, КаоБанг, ЛангШон, ШонЛа, КуангНинь, КуангНам, Дананг, КуангНгай, Лам Донг. Медные рудники в этих провинциях имеют небольшие запасы медной руды и разнообразный минеральный состав, в том числе сульфидные и карбонатные руды, но чаще всего встречаются халькопиритовые руды. Общие запасы разведанных рудников оцениваются примерно 600 000 т меди.

Важными месторождениями медных руд в Вьетнаме являются:

- месторождение Шинь Куен (провинция Лаокай);
- месторождение Бан Фук (провинция ШонЛа);
- месторождение Ван Шай (провинция ШонЛа);
- месторождение Бан Занг (провинция ШонЛа);
- месторождение Нунг Суой (провинция КуангНгай).

Кроме вышеперечисленных основных месторождений, еще есть многие другие месторождения, разбросанные по провинциям Тхань Хоа и ЛангШон.

Оценку распределения, запасов и качества медной руды можно дать на основе данных с двух крупнейших месторождений Вьетнама по ее добыче: Шинь Куен (провинция Лаокай) и Бан Фук (провинция ШонЛа).

Месторождение Шинь Куен считается смешанным рудным районом с тремя основными добываемыми компонентами: медью, редкоземельными элементами и золотом. В местных рудах медь обычно находится в виде сульфида (халькопирита). Месторождение было обнаружено и открыто в 1961–1973 гг. с оцененными запасами 52,7 млн т медной руды со средним содержанием меди в них от 0,5 до 11,58%, что эквивалентно 551,2 тыс. т меди вместе с 35 т золота и 25 т серебра.

⁵Худяков И. Ф., Тихонов А. И., Деев В. И., Набойченко С. С. Металлургия меди, никеля, кобальта: учеб. пособ. В 2 ч., ч. 1, 2. М.: Металлургия, 1977. 295 с.; 263 с.

⁶Гальндбек А. А., Шалыгин Л. М., Шмонин Ю. Б. Расчеты пирометаллургических процессов и аппаратов цветной металлургии. Челябинск: Металлургия, 1990. 448 с.

⁷Набойченко С. С., Юнь А. А. Расчеты гидрометаллургических процессов: учеб. пособ. для вузов. М.: Изд-во «МИСиС», 1995. 428 с.

Месторождение Бан Фук – это крупнейшее месторождение медно-никелевых минералов сульфидного типа в стране, расположенное в районе Та Кхоа (провинция ШонЛа). Этот район исследовался с 1959 по 1963 г. Руды находятся на высоте 100–520 м над уровнем моря. Общие запасы месторождения Бан Фук оцениваются в 3 млн т руды, при этом запасы металлов в руде составляют около 200 тыс. т меди и никеля.

На медном месторождении Шинь Куен было организовано совместное предприятие между компанией цветной металлургии ThaiNguyen и минеральной горнодобывающей компанией LaoCai (обе являются вьетнамскими) для разработки месторождения, добычи медной руды и с последующим производством медного концентрата с содержанием меди 18–20%. Данное совместное предприятие извлекло 615 000 т руды, что эквивалентно 9796 т металлической меди и составляет около 1,8% от общих запасов месторождения.

Это совместное предприятие было основано в 1982 г., но начало свою деятельность в 1994 г. В настоящее время ежегодно предприятие производит около 3 200 т концентрата со средним содержанием меди 18%. Предприятие небольшое и не имеет возможности для расширения производства и, соответственно, для увеличения производства медного концентрата. Таким образом, богатые медные руды добываются и перерабатываются исключительно для экспорта, а все внутреннее потребление меди Вьетнама обеспечивается импортом из других стран. В конце 2000 г. Вьетнамское правительство решило реализовать проект горно-металлургического комплекса (ГМК) по выпуску меди на севере страны (месторождение Шинь Куен), а в 2008 г. был построен первый медеплавильный завод Лаокай. Вся продукция реализовывается на внутреннем рынке Вьетнама. Работа ГМК Шинь Куен не только произвела прорыв для цветной металлургии во Вьетнаме, удовлетворив примерно 1/3 внутреннего потребления меди в промышленности и снизив годовой оборот

импорта меди, больше, чем на 40 млн долларов США, но и сделав важный вклад в экономическое развитие провинции Лаокай и страны в целом.

Медь – продукт стратегического назначения, способный существенно влиять на сектор реальной экономики. Практически все этапы производства меди нуждаются в усовершенствовании. Этап цифровизации во всех промышленных областях накладывает определенные задачи, которые необходимо решить для успешного перехода к цифровой экономике без потери качества конечного продукта, уменьшения воздействия на окружающую среду и ускорения процесса получения конечного продукта.

Сокращение выбросов с оборотными водами, утилизация или очистка электролита, доизвлечение ценных компонентов из водных растворов, снижение энергетической составляющей при производстве меди, получение меди из различных промпродуктов по-прежнему являются актуальными вопросами медной промышленности⁸ [14–16].

СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИ ВО ВЬЕТНАМЕ

Для переработки медного сырья на медеплавильном заводе Лаокай используется китайская технология [17]. После этого осуществляется процесс конвертирования полученного штейна с последующей плавкой, разливкой в аноды и заключительным процессом рафинирования для получения чистой меди.

Электролитическое рафинирование меди преследует две основные цели:

- 1) получение меди высокой чистоты (99,90–99,97%), удовлетворяющей требованиям электротехнической промышленности и производства чистых сплавов;

- 2) извлечение драгоценных и редких металлов, которые присутствуют в большинстве черновой меди.

Все затраты на электролитическое рафинирование меди чаще всего окупаются прибылью от последующей реализации извлекаемых благородных и редких металлов. Под-

⁸Samuelsson C., Björkman B. Copper recycling: handbook of recycling. Elsevier, 2014. P. 85–94.

лежащую электролитическому рафинированию черновую медь предварительно рафинируют огневым способом до достижения содержания меди 98,0–99,5%. Электролиз на всех медеэлектролитных заводах ведут в водном растворе сульфата меди, содержащем свободную серную кислоту. В результате разности потенциалов между электродами ванны происходит электрохимическое растворение меди на аноде и осаждение чистой меди на катоде. Большая часть примесей, содержащихся в анодной меди, осаждается на дне ванны в виде шлама, меньшая часть переходит в раствор, загрязняя электролит.

Примеси, содержащиеся в анодной меди, могут оказывать значительное влияние как на ход технологического процесса электролитического рафинирования меди, так и на качество катодного продукта. Примеси можно разбить на четыре группы:

1. Металлы более электроположительные, чем медь: золото, серебро, платина и ее спутники, селен, теллур и др.

2. Металлы, обладающие потенциалами, более близкими к потенциалу меди: мышьяк, сурьма, висмут.

3. Металлы, имеющие более электроотрицательные потенциалы, чем медь: свинец, олово, никель, кобальт, железо, цинк и др.

4. Различные химические соединения – пассивные в электрохимическом отношении вещества: Cu_2O , Cu_2S , Cu_2Se , Cu_2Te .

Для гидрометаллургического передела характерна работа с большим количеством промышленных растворов и на их оборот, содержащих ионы различных металлов, следует обращать особое внимание. Извлечение ионов металлов из промышленных сточных вод часто затруднено из-за сложного химического состава растворов и высоких затрат на рекуперацию, поскольку сточные воды, как правило, содержат лишь незначительные концентрации ценных металлов.

Использование методов химического осаждения для очистки оборотных растворов не всегда представляется возможным для некоторых предприятий, хотя данные методы наиболее распространены благодаря своей эффективности и невысокой стоимости. Но образование большого количества нераство-

римых осадков, например при использовании известняка, которые также необходимо утилизировать, заставляет искать новые методы очистки растворов.

Одним из таких методов может быть использование электроэнергии, особенно на предприятиях, использующих гидрометаллургический передел для получения медного продукта высокой чистоты. Но из-за низкого содержания ионов меди в оборотных растворах подобный метод может стать очень энергозатратным (при низкой концентрации меди лимитирующей стадией является диффузионная). Однако, с точки зрения экологии, данный метод «чистый» и одностадийный, к тому же не образует вторичных отходов.

В работе [18] было показано, что присутствие в промышленном растворе ионов железа предотвращает процесс электроочистки от чрезмерных энергозатрат благодаря протеканию отличной анодной реакции окисления железа вместо выделения кислорода.

Авторами работы [19] было показано, что присутствие кремния в анодном сплаве обеспечивает снижение потенциала растворения и, соответственно, и снижение энергозатрат на растворение анода.

Следует отметить, что для устойчивого получения меди высоких марок необходимы точные данные об источниках поступления примесей в катодную медь. Требуются сведения о вкладе отдельных механизмов и их интенсивности, в зависимости от величины и сочетания управляющих технологических параметров. Таким образом, для изучения механизма попадания примесей требуется сбор данных о ходе процесса и последующий глубокий анализ технологических процессов в целом. Необходима также разработка определенных средств и методов, которые позволили бы надлежащим образом воздействовать на механизмы включения примесей в катодный осадок.

После электролитического рафинирования полученный анодный шлам используют для извлечения благородных металлов. Печной газ, содержащий SO_2 , используется для производства серной кислоты.

Производство меди на вьетнамском медеплавильном заводе Лаокай включает сле-

дующие операции: подготовку руд к плавке; плавку на штейн; конвертирование штейна; плавку и разливку на аноды, электролитическое рафинирование меди.

Краткая технологическая схема может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

Основной проблемой является то, что технологический процесс на данном медеплавильном заводе во Вьетнаме сильно устарел, и уровень автоматизации находится на примитивном уровне. Это приводит к большому расходу сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, что существенно сказывается на конечной цене продукции. Это происходит даже несмотря на то, что электролитическое рафинирование меди имеет большой удельный расход электроэнергии, но из-за несовершенства контроля и управления основными параметрами процесса значительно затрудняется процесс развития медного производства в данном ре-

гионе, даже несмотря на наличие сырьевой базы. Сбор и анализ параметров с основных технологических узлов позволяет корректировать ведение любого технологического процесса, но на данном этапе развития автоматизации и работы с базами промышленных данных на медеплавильном заводе Лаокай это представляется проблематичным. Сбор информации о таких параметрах, как температура и состав электролита, межполюсное расстояние, содержание и уровень шламовых осадков в электролитной ячейке, говорит о том, что они являются функционально зависимыми друг от друга. Частота измерений параметров и сбор информации для управления системой автоматизированного управления представляет определенные трудности. Основной причиной энергетических потерь во время электролитического рафинирования меди являются короткие замыкания, вызванные нарастанием дендритов между электродами (срастание электродов).

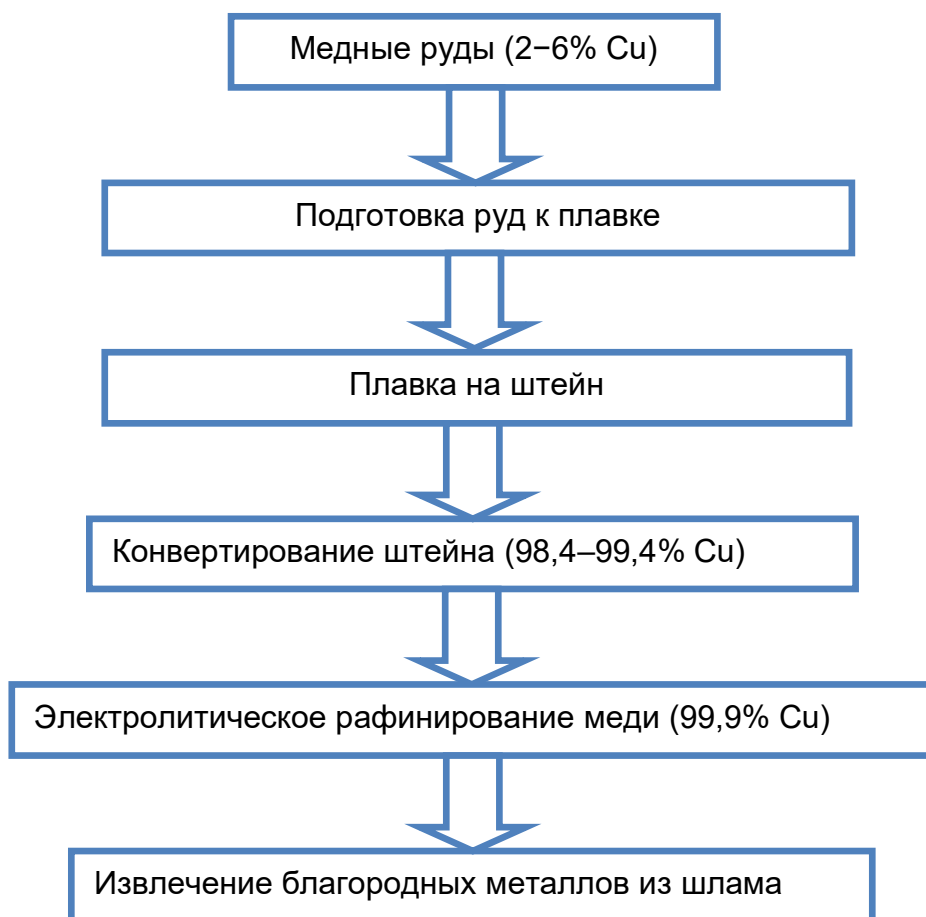


Рис. 1. Технологическая схема производства меди на медеплавильном заводе Лаокай
Fig. 1. Process flow diagram of copper production at Lao Cai copper smelting plant

Материальные потери связаны с образованием шлама в электролизной ванне и с нарушением баланса по драгоценным металлам, которые всегда присутствуют в производстве меди.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПРАКТИКА ПРОИЗВОДСТВА МЕДИ

В России на нескольких медных компаниях ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», АО «Русская медная компания» (РМК), ПАО «ГМК «Норильский никель» существуют, несмотря на типовое оборудование электролитических ячеек, различные подходы в управлении производством. Общей тенденцией является переход к цифровой трансформации и переход от локальных ручных аналоговых измерений к многофункциональному контролю и управлению при помощи нейронных систем [20].

Анализ производства может быть построен на математико-статистической обработке больших массивов данных по химическому составу технологически связанных продуктов электролиза. Для этого на предприятии должна быть отлаженная система накопления данных о составе основных технологических параметров, например: анодных плавок, катодных выгрузок, концентрации компонентов электролита, продолжительности анодных и катодных кампаний, данных о межполюсном расстоянии и других важных технологических показателях⁹. Часто все эти огромные массивы данных идентифицируются только на основе календарных сроков их получения. При этом может не учитываться, что, например, химические составы анодов и шламов, датированные одним и тем же числом, технологически совершенно не связаны друг с другом, поскольку шламы формировались из анодов, которые были загружены тремя неделями ранее, а аноды, которые попали в загрузку, были выплавлены еще раньше. В связи с этим, все данные должны быть специально подготовлены для синхронного представления с учетом времени.

Создание цифровой системы контроля основных параметров с вводом дополнительных точек контроля и сбора информации во время всего процесса электролитического рафинирования меди для быстрой оценки функциональных связей является актуальной задачей, которую возможно решить, используя опыт как отечественных, так и зарубежных предприятий.

В настоящее время существуют передовые практики и технологии, связанные с разработкой автоматизированных систем управления основных переделов получения меди из руды и переработки медного лома. Такие компании, как АО «Русская медная компания», ПАО «Норильский никель», «KazMinerals» (Казахстан), «Cuprum» (Чили) и другие, успешно используют разработки с учетом современных требований по цифровизации технологических процессов. Сотрудники института «Гипроникель», Санкт-Петербургского горного университета, Южно-Уральского технического университета принимают активное участие в разработке подобных технологий и их внедрении в действующие производства.

На современных предприятиях по производству меди из руд или по переработке медного лома необходимо учитывать непостоянную инфраструктуру, удаленность объектов и их многопрофильность. Вопросы, связанные с оптимизацией металлургических процессов, должны быть учтены при постановке задач комплексной автоматизированной системы управления. Все основные этапы переработки или производства меди неразрывно связаны и имеют свою специфику. Например, пирометаллургическое производство характеризуется высокими температурами и нелинейными технологическими процессами. Комплексная система управления должна увязывать воедино управление отдельными процессами и производствами. Система управления должна делать производственную картину структурированной, последовательной и функционально законченной [21].

⁹Спирин Н. А., Лавров В. В., Рыболовлев В. Ю., Гилева Л. Ю., Краснобаев А. В. [и др.]. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП: учеб. пособ. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. 553 с.

На Надеждинском медеплавильном заводе (НМЗ) ПАО «ГМК Норильский Никель» в цехе электролиза меди внедрены передовые технологии. В отличие от других подобных производств электролизный цех НМЗ работает на самом минимальном межполюсном расстоянии. Благодаря этому электролизные ванны имеют высокие выход по току и производительность при минимальном расходе электроэнергии (рис. 2). Интенсифицировать

процесс за счет повышения анодной плотности тока позволяет высокое техническое оснащение процесса. Контроль за возникновением коротких замыканий между электродами осуществляется при помощи сканеров-тепловизоров (рис. 3). Специальная прикладная программа считывает данные температурных отклонений и выдает сигнал оператору.

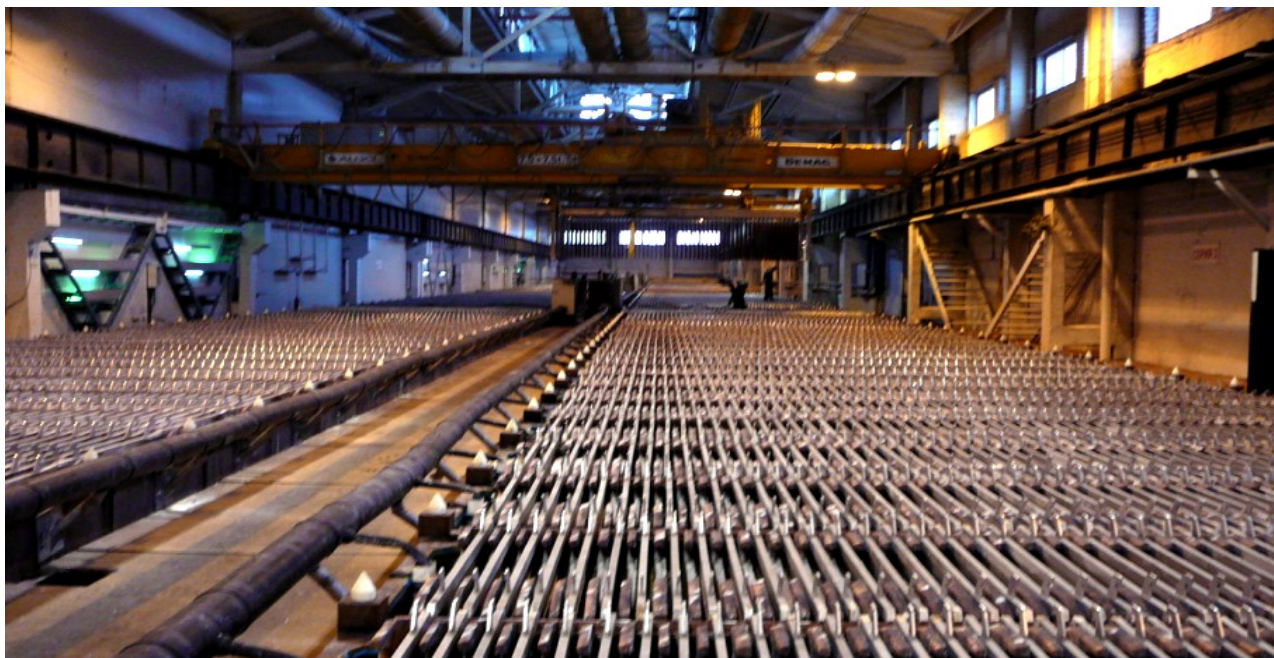
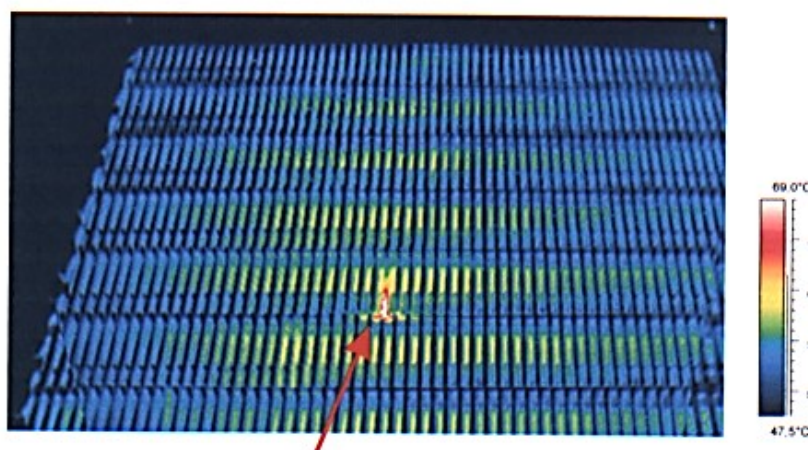


Рис. 2. Электролизный цех на Надеждинском металлургическом заводе
Fig. 2. Electrolysis shop at Nadezhdinsky metallurgical plant



Короткозамкнутая пара электродов

Рис. 3. Термограмма контроля температуры поверхности электродов при помощи тепловизора
Fig. 3. Thermogram for electrode surface temperature control using a thermal imager

На предприятиях АО «Русская медная компания» реализуется проект «умная медь», который представляет собой стандарт организации производства, который РМК внедряет на своих предприятиях. Согласно этому стандарту, производство должно соответствовать высоким требованиям к качеству продукции, охране окружающей среды и оставаться ответственным с точки зрения развития территорий присутствия, на которых располагаются предприятия РМК.

«Умная медь» – это не только промышленный стандарт, но и сформулированная в результате плотного и продуктивного взаимодействия с крупнейшими мировыми производителями высокотехнологичной техники – «Outotec», «Metso Minerals», «Komatsu», «Atlas Copco» – философия бизнеса компании, которая показала свою эффективность. Такой опыт может быть полезен при реорганизации устаревших предприятий развивающихся стран.

Не только решение вопросов автоматизации способно оптимизировать современные производства. Совершенствование технологии переработки медного лома может значительно снизить энергопотребление производства, что может оказаться определяющим фактором при выборе той или иной технологии для стран с дефицитом электроэнергии. Например, в работах [22, 23] показано, что добавление оксида кремния при плавке с разливкой анодов дает увеличение скорости растворения за счет уменьшения пассивации анодов и снижения расхода электроэнергии. А при переработке медного лома, содержащего благородные металлы, возможно ис-

пользование разделения катодного и анодного пространства диафрагмами, а также применение хлорсодержащего электролита, что дает значительное уменьшение потерь благородных металлов и увеличение скорости растворения анодов. Такое решение существенным образом уменьшает энергетическую нагрузку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день можно сказать, что в Азиатско-Тихоокеанском регионе, и особенно во Вьетнаме, развитие промышленного производства быстро набирает темп. В стране практически во всех отраслях тяжелой и добывающей промышленности наблюдается внедрение инновационных технологических процессов. Использование автоматизированной системы управления или внедрение технологий с учетом требований «Индустрии 4.0» в практике работы металлургических предприятий является одним из важнейших факторов повышения эффективности технико-экономических показателей. Такой подход позволяет предприятию повысить эффективность производства, перейти на новый уровень качества продукции, сократить трудовые и иные затраты, повысить уровень безопасности на производстве.

В этой связи для решения существующих проблем необходимо создать систему автоматизированного управления металлургическим производством, позволяющую инженерно-технологическому персоналу оперативно осуществлять управление и контроль производства медеплавильного завода.

Список источников

1. Davenport W. G., King M. J., Schlesinger M. E., Biswas A. K. Extractive metallurgy of copper. London: Oxford, Pergamon, 2002. 452 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> (12.06.2021).
2. Антонов М. А. Метод порошковой металлургии для спекания изделий из медных порошков // Металлообработка. 2001. № 5. С. 48–49.
3. Selivanov E. N., Popov A. I., Selmenskikh N. I., Lebed A. B. Oxide inclusions in copper during its fire refining // Non-ferrous Metals. 2013. No. 2. P. 19–22.
4. Вольхин А. И., Елисеев Е. И., Жуков В. П., Смирнов

- Б. Н. Анодная и катодная медь: физико-химические и технологические основы. Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 2001. 431 с.
5. Левин А. И., Номберг Н. И. Электролитическое рафинирование меди. М.: Металлургиздат, 1963. 213 с.
6. Скирда О. И., Ладин Н. А., Дылько Г. Н. Определение оптимального состава электролита для электролитического рафинирования меди // Записки Горного института. 2005. Т. 165. С. 170–171.
7. Гронь Д. Н., Горенский Б. М. Информационно-управляющая система процессом электролитического рафинирования меди // Журнал Сибирского феде-

рального университета. Техника и технологии. 2009. Т. 2. № 3. С. 301–310.

8. Гронь Д. Н., Любанова А. Ш., Ченцов С. В. Повышение эффективности управления процессом электролитического рафинирования меди с помощью СППР // Фундаментальные исследования. 2013. № 8-4. С. 822–827. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32003> (09.06.2021).

9. Мансурова О. К., Читкова Я. В. Контроль и управление межэлектродным расстоянием при электролитическом рафинировании меди // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. VII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 5 июня 2019 г.). Пенза: Изд-во «Наука и Просвещение», 2019. Ч. 2. С. 268–272.

10. Гавриленко А. Н., Старых Р. В., Хабибуллин И. Х., Матухин В. Л. Метод ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в локальном поле в исследовании рудных медных концентратов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 9. С. 31–35.

11. Молошаг В. П., Колотов С. В., Гуляева Т. Я. Новые данные о сульфидах меди и серебра в рудах колчеданных месторождений Урала // Уральский минералогический сборник. 1995. № 5. С. 223–231.

12. Дистлер В. В., Крячко М. А., Юдовская В. В. Условия образования оруденения платиновых металлов в хромитовых рудах Кемпирсайского рудного поля // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 1. С. 44–74.

13. Степанов В. А., Гвоздев В. И., Трухин Ю. П., Кунгурова В. Е., Молчанова Г. Б. Минералы благородных и редких металлов в рудах Шанучского медно-никелевого месторождения (Камчатка) // Записки Российского минералогического общества. 2010. Т. 139. № 2. С. 43–58.

14. Булатов К. В., Жуков В. П. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 421–433. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>.

15. Жмурова В. В., Немчинова Н. В., Васильев А. А. Гидрохимическая очистка от меди и свинца

золотосодержащих катодных осадков // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 64–74.

<https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>.

16. Schipper B. W., Lin H.-C., Meloni M. A., Wansleebe K., Heijungs R., Van der Voet E. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics // Resources, Conservation & Recycling. 2018. Vol. 132. P. 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.004>.

17. Мазырин В. М. Экономика Вьетнама на подъеме: тенденции 2013–2014 г. // Вьетнамские исследования. 2015. № 5. С. 182–207.

18. Hannula P.-M., Khalid M. K., Janas D., Yliniemi K., Lundström M. Energy efficient copper electrowinning and direct deposition on carbon nanotube film from industrial wastewaters // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 207. P. 1033–1039. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.097>.

19. Alexandrova T. A., Gorlenkov D. V., Romanova N. A. Researching of influence of tungsten, silicon and impurities oxidation on electrolytic dissolution of Cu-Zn and Fe-Ni-Co anodes // Periódico Tchê Química. 2017. Vol. 14. No. 28. P. 9–17.

20. Шаламов А. В., Мазеин П. Г. Нейронные сети как новый подход к управлению технологическим оборудованием // Известия Челябинского научного центра. 2003. Вып. 1. С. 60–64.

21. Кадыров Э. Д. Комплексная автоматизированная система управления пирометаллургическим производством меди // Записки Горного Института. 2011. Т. 192. С. 120–124.

22. Пат. 2357012, Российская Федерация, С1, С25С 1/20 (2006.01). Способ извлечения благородных металлов из отходов радиоэлектронной промышленности / В. С. Литвиненко, Н. М. Теляков, Д. В. Горленков; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова. Заявл. 25.12.2007; опубл. 27.05.2009. Бюл. № 15.

23. Пат. 2553320, Российская Федерация, С1, С25С 1/20 (2006.01). Способ извлечения благородных металлов из отходов радиоэлектронной промышленности / А. Н. Теляков, Д. В. Горленков, Т. А. Александрова, Д. В. Шмидт, А. И. Закирова; заявитель и патентообладатель Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Заявл. 27.03.2014; опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16.

References

1. Davenport W. G., King M. J., Schlesinger M. E., Biswas A. K. *Extractive metallurgy of copper*. London: Oxford, Pergamon; 2002, 452 p. Available from: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> [Accessed 12th June 2020].

2. Antonov M. A. Method of powder metallurgy for sintering products from copper powders. *Metalloobrabotka*. 2001;5:48-49. (In Russ.).

3. Selivanov E. N., Popov A. I., Selmenskikh N. I., Lebed A. B. Oxide inclusions in copper during its fire refining. *Non-ferrous Metals*. 2013;2:19-22.

4. Vol'hin A. I., Eliseev E. I., Zhukov V. P., Smirnov B. N. *Anode and cathode copper: physicochemical and technological fundamentals*. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo; 2001, 431 p. (In Russ.).

5. Levin A. I., Nomborg N. I. *Electrolytic refining of copper*. Moscow: Metallurgizdat; 1963, 213 p. (In Russ.).

6. Skirda O. I., Ladin N. A., Dyl'ko G. N. Determining electrolyte optimal composition for electrolytic refining of copper. *Zapiski Gornogo instituta*. 2005;165:170-171. (In Russ.).

7. Gron D. N., Gorensky B. M. Information-operating system process of electrolytic refinement of copper. *Zhurnal*

Sibirskogo federal'nogo universiteta. *Tekhnika i tekhnologiya = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2009;2(3):301-310. (In Russ.).

8. Gron' D. N., Lyubanova A. Sh., Chencov S. V. Improved management of the process of electrolytic refining of copper with the help of decision support systems. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013;8-4:822-827. Available from: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32003> [Accessed 9th June 2020]. (In Russ.).

9. Mansurova O. K., Chitkova Ya. V. Control and management of interelectrode distance in electrolytic copper refining. *Sovremennaya nauka: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii: sbornik statej VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern science: relevant issues, achievements and innovations: collected articles of VII International scientific and practical conference*. 5 June 2019, Penza. Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2019, vol. 2, p. 268-272. (In Russ.).

10. Gavrilenko A. N., Staryh R. V., Habibullin I. H., Matuhin V. L. ^{63,65}Cu NMR method in the local field when studying ore copper concentrates. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Fizika = Russian Physics Journal*. 2014;57(9):31-35. (In Russ.).

11. Moloshag V. P., Kolotov S. V., Gulyaeva T. Ya. New data on copper and silver sulfides in ores of the Urals pyrite deposits. *Ural'skij mineralogicheskij sbornik*. 1995;5:223-231. (In Russ.).

12. Distler V. V., Kryachko M. A., Yudovskaya V. V. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field. *Geologiya rudnykh mestorozhdenij*. 2003;45(1):44-74. (In Russ.).

13. Stepanov V. A., Gvozdev V. I., Truhin Yu. P., Kungurova V. E., Molchanova G. B. Minerals of precious and rare metals in ores of Shanuchskoye copper-nickel deposit (Kamchatka). *Zapiski Rossijskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2010;139(2):43-58. (In Russ.).

14. Bulatov K. V., Zhukov V. P. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. *Vestnik Irkutskogo*

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):421-433. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>.

15. Zhmurova V. V., Nemchinova N. V., Vasiliev A. A. Removal of copper and lead from gold-bearing cathode deposits by hydrochemical treatment. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:67-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>.

16. Schipper B. W., Lin H.-C., Meloni M. A., Wansleben K., Heijungs R., Van der Voet E. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. *Resources, Conservation & Recycling*. 2018;132:28-36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.004>.

17. Mazyrin V. M. Vietnam's economy is on the rise: trends of 2013-2014. *V'etnamskie issledovaniya*. 2015;5:182-207.

18. Hannula P.-M., Khalid M. K., Janas D., Yliniemi K., Lundström M. Energy efficient copper electrowinning and direct deposition on carbon nanotube film from industrial wastewaters. *Journal of Cleaner Production*. 2019;207:1033-1039. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.097>.

19. Alexandrova T. A., Gorlenkov D. V., Romanova N. A. Researching of influence of tungsten, silicon and impurities oxidation on electrolytic dissolution of Cu-Zn and Fe-Ni-CO anodes. *Periódico Tchê Química*. 2017;14(28):9-17.

20. Shalamov A. V., Mazein P. G. Neural networks as a new approach to technological equipment control. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra*. 2003;1:60-64. (In Russ.).

21. Kadyrov E. D. *Integrated automated process control system of pyrometallurgical copper production*. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2011;192:120-124. (In Russ.).

22. Litvinenko V. S., Telyakov N. M., Gorlenkov D. V. *Extraction method of noble metals from radio-electronic industry waste*. Patent RF, no. 2357012; 2009. (In Russ.).

23. Telyakov A. N., Gorlenkov D. V., Aleksandrova T. A., Shmidt D. V., Zakirova A. I. *Extraction method of noble metals from radio-electronic industry waste*. Patent RF, no. 2553320; 2015. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажин Владимир Юрьевич,

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Горленков Денис Викторович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Yu. Bazhin,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of
Automation of Technological Processes and Production,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg 199106, Russia

Denis V. Gorlenkov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Automation of Technological Processes
and Production,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg 199106, Russia

Нгуен Хю Хоанг,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Huu Hoang Nguyen,
Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg 199106, Russia

Никитина Любовь Николаевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизации
технологических процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Lyubov N. Nikitina,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of
Automation of Technological Processes and Production,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg 199106, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.07.2021; одобрена после рецензирования 02.09.2021; принята к публикации 21.10.2021.

Information about the article

The article was submitted 18.07.2021; approved after reviewing 02.09.2021; accepted for publication 21.10.2021.



Dynamical control on the Adomian decomposition method for solving shallow water wave equation

Laleh Noeiaghdam^{1✉}, Samad Noeiaghdam², Denis N. Sidorov³

¹ Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

^{2,3} Industrial Mathematics Laboratory, Baikal School of BRICS, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

³ L. A. Melentiev Institute of Energy Systems of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

¹ l_noeiaghdam@yahoo.com

² snoei@istu.edu; noiagdams@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2307-0891>

³ dsidorov@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Abstract: The aim of this study is to apply a novel technique to control the accuracy and error of the Adomian decomposition method (ADM) for solving nonlinear shallow water wave equation. The ADM is among semi-analytical and powerful methods for solving many mathematical and engineering problems. We apply the Controle et Estimation Stochastique des Arrondis de Calculs (CESTAC) method which is based on stochastic arithmetic (SA). Also instead of applying mathematical packages we use the Control of Accuracy and Debugging for Numerical Applications (CADNA) library. In this library we will write all codes using C++ programming codes. Applying the method we can find the optimal numerical results, error and step of the ADM and they are the main novelties of this research. The numerical results show the accuracy and efficiency of the novel scheme.

Keywords: shallow water wave problem, Adomian decomposition method, CESTAC method, CADNA library

For citation: Noeiaghdam L., Noeiaghdam S., Sidorov D. N. Dynamical control on the Adomian decomposition method for solving shallow water wave equation. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):623-632. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-623-632>.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 519.6

Численная валидация метода разложения Адомиана для решения нелинейного уравнения мелкой воды

Лале Нойягдам^{1✉}, Самад Нойягдам², Денис Николаевич Сидоров³

¹ Технологический университет Амиркабира, г. Тегеран, Иран

^{2,3} Лаборатория промышленной математики, Байкальский институт БРИКС, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

³ Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

¹ l_noeiaghdam@yahoo.com

² snoei@istu.edu; noiagdams@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2307-0891>

³ dsidorov@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Аннотация. Целью данной работы является применение новой методики для проведения эффективного контроля точности и анализа погрешности применения метода разложения Адомиана для решения нелинейного волнового уравнения мелкой воды, возникающего при выполнении ряда важных задач в различных областях машиностроения и теории материалов. Рассмотрены три важных случая: набегание жидкости на полуплоские берега, на берега с умеренным уклоном и на берега с крутым уклоном. В исследованиях применялся метод раз-

ложения Адомиана, являющийся полуаналитическим эффективным методом, обладающим большей гибкостью, чем прямое разложение в ряд Тейлора. В данном исследовании мы применяем метод CESTAC (Contrôle et Estimation STochastique des Arrondis de Calculs), основанный на стохастической арифметике. Также вместо применения стандартных математических пакетов в работе эффективно использована библиотека контроля точности и отладки для численных приложений CADNA (Control of Accuracy and Debugging for Numerical Applications). Программная реализация подхода с использованием библиотеки CADNA выполнена на C++ под операционную систему LINUX. Вместо использования традиционной абсолютной ошибки, которая основана на точном решении и небольшом пороговом значении, используем новое правило останова, которое основано на двух последовательных приближениях. Основная теорема метода CESTAC показывает, что количество общих значащих цифр двух последовательных приближений практически равно количеству общих значащих цифр точного и приближенного решений. Применение представленной в работе методики позволило получить оптимальные численные результаты: найти погрешность и оптимальный шаг метода разложения Адомиана, чего не позволяли делать классические подходы. В этом заключается основная новизна работы. Приведены результаты тестирования разработанной численной модели для решения уравнения мелкой воды. Таким образом, при проведении численных расчетов с использованием предлагаемого метода разложения Адомиана продемонстрирована высокая точность и эффективность разработанного подхода для решения нелинейного волнового уравнения мелкой воды.

Ключевые слова: волновая задача на мелководье, метод разложения Адомиана, метод CESTAC, библиотека CADNA

Для цитирования: Нозягдам Л., Нозягдам С., Сидоров Д. Н. Численная валидация метода разложения Адомиана для решения нелинейного уравнения мелкой воды // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 623–632. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-623-632>.

INTRODUCTION

Finding numerical and accurate methods for solving wave equation is one of important topics in applied mathematics [1–26]. The problem has special and important applications to simulate Tsunami phenomenon. Tsunamis can be categorized as long waves. In general form we apply the solitary waves or combinations of negative and positive solitary-like waves to simulate this phenomenon. Also many other applications of the shallow water wave problems can be found in the field of metallurgy and materials science. The horizontal centrifugal casting using shallow water model has been discussed by Boháček et al. in [4]. Also Bresch et al. in [5] have focused on some compressible fluid models specially the shallow water system. In [13] Nobel and Vila have discussed the thin power-law film flow

down an inclined plane: consistent shallow-water models.

In this study we discuss the following problem which is the specific case of the run-up of two dimensional long waves incident upon a uniform sloping beach connected to an open ocean with a uniform depth (fig. 1).

We consider the following nonlinear shallow-water equations:

$$\begin{aligned} \eta_t + (u(h + \eta))_x &= 0; \\ u_t + uu_x + g\eta_x &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

where wave domain is displayed by η , the depth averaged velocity is showed by u , the variable depth is presented by h , the acceleration of gravity is exhibited by g . Also the initial conditions are given

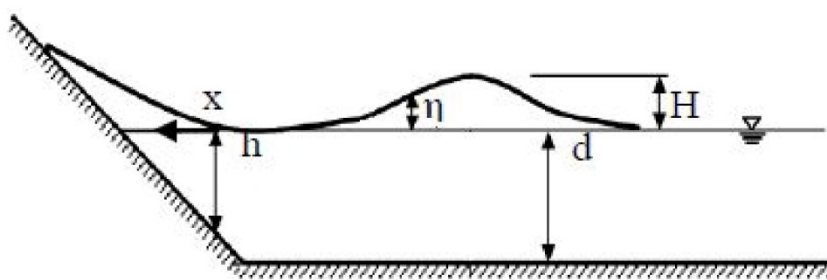


Fig. 1. Definition Sketch for solitary wave run-up
Рис. 1. Эскиз определения для набега уединенной волны

$$\begin{aligned}\eta(x, 0) &= H \operatorname{sech}^2 \sqrt{\frac{3H}{4d^3}} x; \\ u(x, 0) &= \frac{\eta}{d} \sqrt{gd},\end{aligned}\quad (2)$$

where the initial wave height and stationary elevation are displayed by H and d respectively.

Noeiaghdam et al. in [15] applied the homotopy analysis method for solving this problem. Approximate traveling wave solution has been discussed by some authors in [1, 12]. A new analytical solution for nonlinear shallow water-wave equation can be found in [3]. In [2] the stability analysis of two dimensional extended shallow water wave equation has been illustrated. Also in [22] the space-time fractional shallow water wave equation has been studied.

Adomian decomposition method is among semi-analytical and powerful methods for solving many kinds of linear and non-linear problems. Solving Volterra integral equation with discontinuous kernel [18], first kind integral equations with hyper-singular kernels [20], ordinary differential equations [10] and fuzzy Convection-Diffusion equation [11] are only some of applications of the ADM.

In the mentioned papers and many other studies the computations have been obtained using floating point arithmetic (FPA). In FPA in order to show the accuracy we should apply the traditional conditions which are based on the exact solution and ε as follows

$$|Q - Q_J| \leq \varepsilon, \text{ or } |Q_J - Q_{J-1}| \leq \varepsilon. \quad (3)$$

In real life problems that we do not have exact solution it will be impossible to use the conditions. Also the optimal value of ε is unknown for us. Thus choosing small or large values for ε either we will not be able to find the accurate results or we will have many iterations without improving the accuracy.

In this study instead of applying FPA, we use SA and a novel condition based on successive iterations Q_J and Q_{J-1} as

$$|Q_J - Q_{J-1}| = @.0. \quad (4)$$

@.0 shows the informatical zero which can be produced only in SA when we apply the CESTAC method and the CADNA library. It shows that number of common significant digits (NCSDs) of two successive iterations are almost zero. The CESTAC method has been presented by Vignes and Laporte [21]. Also a French research team has been improved the method and also the library [6–9]. In [16] the CESTAC method has been applied to control the accuracy of a nonlinear fractional order model of COVID-19. A dynamical control on the reverse osmosis system can be found in [14, 19]. Also in [17] the CESTAC method has been used to validate the results of numerical methods for solving integral equations.

In this paper, we apply the famous Adomian decomposition method for solving problem (1). Also using the CESTAC method and the CADNA library we try to control the accuracy of the results. The main novelty of this study is to find the optimal approximations, optimal error and optimal step of the method.

ADOMIAN DECOMPOSITION METHOD

Consider the following problem:

$$Lu + R(u) + F(u) = g(t), \quad (5)$$

where L is the operator of the highest-ordered derivatives with respect to t and R is the remainder of the linear operator. Also we show the nonlinear term with $F(u)$. We can write

$$Lu = g(t) - R(u) - F(u). \quad (6)$$

Now we can define the following inverse operator:

$$L_t^{-1} = \int_0^t (.) dt. \quad (7)$$

Applying the inverse operator L_t^{-1} for both sides of (7) we get

$$u = f_0 + L_t^{-1}[g(t) - R(u) - F(u)], \quad (8)$$

where f_0 is the solution of homogeneous equation $Lu = 0$ involving the constants of integration. The integration constants involved in the

solution of the mentioned homogeneous equation are to be determined by the initial or boundary condition according as the problem is initial-value problem or boundary-value problem.

According to the ADM we can assume that the solution can be obtained in the form of the following series solution:

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t), \quad (9)$$

and also for the nonlinear term $F(u)$ we have

$$F(u) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n, \quad (10)$$

$$\begin{cases} L_t \eta(x, t) + L_x[u(x, t)h(x)] + L_x[u(x, t)\eta(x, t)] = 0, \\ L_t u(x, t) + u(x, t)L_x u(x, t) + gL_x \eta(x, t) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Now we can apply the inverse operator L_t^{-1} for both sides of (13) as

$$\begin{cases} \eta(x, t) = \eta(x, 0) - L_t^{-1}L_x[u(x, t)h(x)] - L_t^{-1}L_x[u(x, t)\eta(x, t)], \\ u(x, t) = u(x, 0) - L_t^{-1}[u(x, t)L_x u(x, t)] - gL_t^{-1}L_x[\eta(x, t)]. \end{cases} \quad (14)$$

According to the traditional ADM for nonlinear terms $u\eta$ and uu_x the following terms can be applied

$$u\eta = \sum_{n=0}^{\infty} A_n, uu_x = \sum_{n=0}^{\infty} B_n, \quad (15)$$

where

$$A_0 = u_0\eta_0,$$

$$A_1 = u_0\eta_1 + u_1\eta_0,$$

$$A_2 = u_0\eta_2 + u_1\eta_1 + u_2\eta_0, \quad (16)$$

$$A_3 = u_0\eta_3 + u_1\eta_2 + u_2\eta_1 + u_3\eta_0,$$

⋮

and

$$\begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n(x, t) = \eta(x, 0) - L_t^{-1}L_x[\sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t)h(x)] - L_t^{-1}L_x[\sum_{n=0}^{\infty} A_n], \\ \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t) = u(x, 0) - L_t^{-1}[\sum_{n=0}^{\infty} B_n] - gL_t^{-1}L_x[\sum_{n=0}^{\infty} \eta_n(x, t)]. \end{cases} \quad (19)$$

where

$$A_n = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{d\lambda^n} [F(\sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i u_i)]_{\lambda=0}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

MAIN IDEA

Applying the following operators:

$$L_t = \frac{\partial}{\partial t}, L_x = \frac{\partial}{\partial x}, \quad (12)$$

and also the inverse operator $L_t^{-1} = \int_0^t (\cdot) dt$ on (1) we get

$$B_0 = u_{0x}u_0,$$

$$B_1 = u_{0x}u_1 + u_{1x}u_0,$$

$$B_2 = u_{0x}u_2 + u_{1x}u_1 + u_{2x}u_0, \quad (17)$$

$$B_3 = u_{0x}u_3 + u_{1x}u_2 + u_{2x}u_1 + u_{3x}u_0,$$

⋮

Thus substituting

$$\eta(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n(x, t), \quad (18)$$

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t),$$

in (14) we get

Following Adomian approach we obtain the following recursive relation:

$$\begin{aligned}\eta_0(x, t) &= \eta(x, 0), \\ u_0(x, t) &= u(x, 0), \\ &\vdots \\ \eta_{k+1}(x, t) &= -L_t^{-1} L_x [u_k(x, t) h(x)] - L_t^{-1} L_x [A_k], \\ u_{k+1}(x, t) &= -L_t^{-1} [B_k] - g L_t^{-1} L_x [\eta_k(x, t)].\end{aligned}\quad (20)$$

The m -th order approximate solution can be obtained using the following relations

$$\begin{aligned}\eta_m(x, t) &= \sum_{n=0}^m \eta_n(x, t), \\ u_m(x, t) &= \sum_{n=0}^m u_n(x, t).\end{aligned}\quad (21)$$

CESTAC method-CADNA library. Assume that some representable values are produced by computer and they are collected in set A . Then $W \in A$ can be produced for $w \in R$ with $\mathcal{R}$ mantissa bits of the binary FPA in the following form

$$W = w - \chi 2^{E-\mathcal{R}} \xi, \quad (22)$$

$$C_{\chi_1, \chi_2} = \begin{cases} \log_{10} \left| \frac{\chi_1 + \chi_2}{2(\chi_1 - \chi_2)} \right| = \log_{10} \left| \frac{\chi_1}{\chi_1 - \chi_2} - \frac{1}{2} \right|, & \chi_1 \neq \chi_2, \\ +\infty, & \chi_1 = \chi_2. \end{cases} \quad (23)$$

Theorem 1. Applying the ADM for solving the shallow water wave problem (1), the NCSDs of the exact and approximate solutions are almost equal to the NCSDs of two successive approximations as

$$C_{\eta_m, \eta_{m+1}} \approx C_{\eta, \eta_m};$$

$$C_{u_m, u_{m+1}} \approx C_{u, u_m}.$$

NUMERICAL ILLUSTRATIONS

Assuming $H = 2$ and $d = 20$, we discuss the results in three forms 1 – Semi-flat shores ($h(x) = 0.2x - 20$), 2 – Moderate-slope shores ($h(x) = x - 100$), 3 – Sharp-slope shores

where sign of w showed by χ , missing segment of the mantissa presented by $2^{-\mathcal{R}} \xi$ and the binary exponent of the result characterized by E . Moreover, in single and double precisions $\mathcal{R} = 24, 53$ respectively [6, 21, 23].

Assume ξ is the casual variable that uniformly distributed on $[-1, 1]$. After making perturbation on final mantissa bit of w we will have (μ) and (σ) as mean and standard deviation for results of W which they have important role in accuracy of W . Repeating this process J times for $W_i, i = 1, \dots, J$ we will have quasi Gaussian distribution for results. It means that μ for these data equals to the exact w . It is clear that we should find μ and σ based on $W_i, i = 1, \dots, J$. For more consideration, the following algorithm is presented where τ_δ is the value of T distribution as the confidence interval is $1 - \delta$ with $J - 1$ freedom degree [7–9]. We should note that in the CESTAC method instead of applying usual applications such as Mathematica and Maple we use the CADNA library [23].

Definition 1. [15, 16] Number of common significant digits for two real numbers χ_1, χ_2 can be defined as

($h(x) = 5x - 500$). We apply the ADM for solving problem (1) and we use the CESTAC method and the CADNA library to validate the results. Fig. 2, 3 and 4 show the approximate solutions for the mentioned shores for $x = t = 0.1$. According to results of tab. 1 and 2, optimal approximation and optimal error of method for solving shallow water wave equation are obtained. Thus the optimal approximation of $u(x, t)$ is 2.0006415328545538, the optimal step is $m_{opt} = 6$ and the optimal error 4.5×10^{-5} . Also, for the approximate solution of $\eta(x, t)$ is 1.401153672165483, the optimal step is $m_{opt} = 6$ and the optimal error 2.8×10^{-5} .

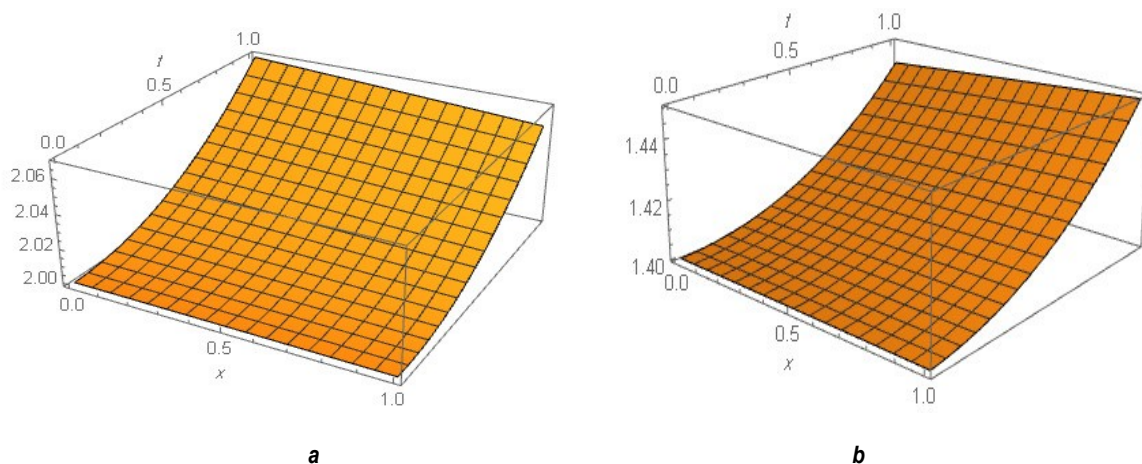


Fig. 2. Approximate solution for semi-flat shores mode: a – $\eta(x,t)$; b – $u(x,t)$
Рис. 2. Приближенное решение для режима пологих берегов: а – $\eta(x,t)$; б – $u(x,t)$

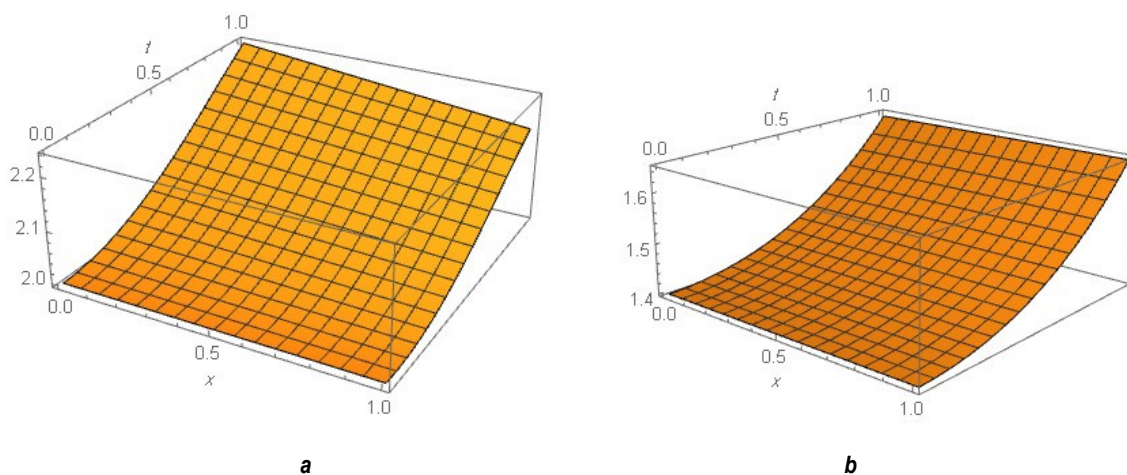


Fig. 3. Approximate solution for moderate-slope shores mode: a – $\eta(x,t)$; b – $u(x,t)$
Рис. 3. Приближенное решение для режима берегов с умеренным уклоном: а – $\eta(x,t)$; б – $u(x,t)$

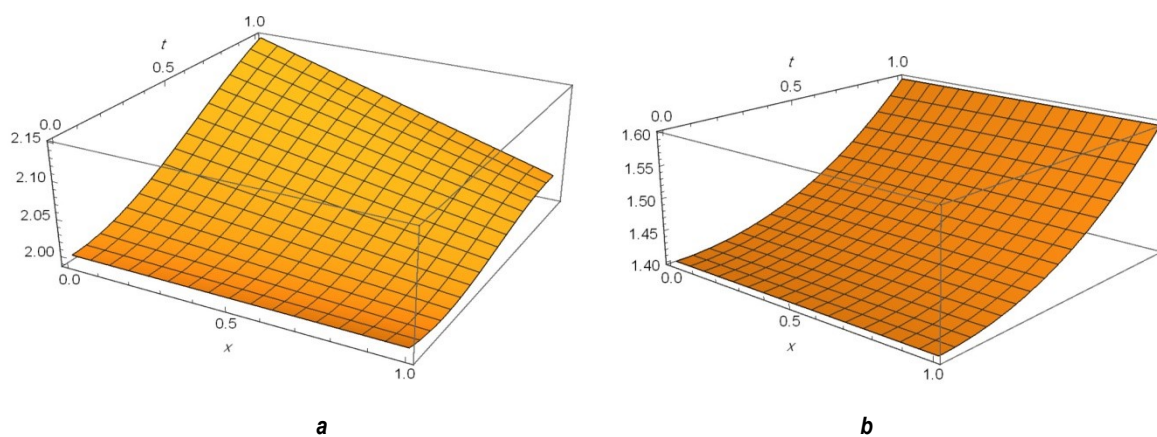


Fig. 4. Approximate solution for sharp-slope shores mode: a – $\eta(x,t)$; b – $u(x,t)$
Рис. 4. Приближенное решение для режима берегов с резким уклоном: а – $\eta(x,t)$; б – $u(x,t)$

Table 1. Applying the CESTAC method for numerical results of $u(x, t)$ **Таблица 1.** Применение метода CESTAC для численных результатов $u(x, t)$

m	u_m	$ u_m - u_{m+1} $
1	1.9999962462046976	1.999996246
2	1.9999489773636574	4.72688×10^{-5}
3	2.0003222299202164	3.7325×10^{-4}
4	2.000504545245128	1.8231×10^{-4}
5	2.0005981472797174	9.36×10^{-5}
6	2.0006434267503708	4.5×10^{-5}
7	2.0006415328545538	@.0.

Table 2. Applying the CESTAC method for numerical results of $\eta(x, t)$ **Таблица 2.** Применение метода CESTAC для численных результатов $\eta(x, t)$

m	η_m	$ \eta_m - \eta_{m+1} $
1	1.4006973710294601	1.4007
2	1.4007378405649158	4.04695×10^{-5}
3	1.4009610914243738	2.2325×10^{-4}
4	1.4010754534197702	1.143×10^{-4}
5	1.401131280443496	5.58×10^{-5}
6	1.401159855883387	2.8×10^{-5}
7	1.401153672165483	@.0.

CONCLUSIONS

The ADM is a good and accurate method for solving linear and non-linear problems. Applying the method we found the approximate solution of the non-linear shallow water wave problem. Combining the ADM with the CESTAC method

we tried to find the optimal approximation, step and error of the method. We applied the CADNA library to find the results. Plotting the graphs of approximate solution for semi-flat, moderate-slope and sharp-slope shores we showed the efficiency of the method.

References

1. Abdelsalam U. M. Traveling wave solutions for shallow water equations. *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2017;2(1):28-33. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2017.02.002>.
2. Adeyemo O. D., Khalique C. M. Stability analysis, symmetry solutions and conserved currents of a two-dimensional extended shallow water wave equation of fluid mechanics. *Partial Differential Equations in Applied Mathematics*. 2021;4:100134. <https://doi.org/10.1016/j.padiff.2021.100134>.
3. Aydin B., Kanoğlu U. New analytical solution for nonlinear shallow water-wave equations. *Pure and Applied Geophysics*. 2017;174:3209-3218. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1508-z>.
4. Boháček J., Kharicha A., Ludwig A., Wu Menghuai. Shallow water model for horizontal centrifugal casting. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2012;33. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/33/1/012032>.
5. Bresch D., Desjardins B., Lin Chi-Kun. On some compressible fluid models: Korteweg, lubrication, and shallow water systems. *Communications in Partial Differential Equations*. 2003;28(3-4):843-868. <https://doi.org/10.1081/PDE-120020499>.
6. Scott N. S., Jézéquel F., Denis C., Chesneaux J. M. Numerical 'health check' for scientific codes: the CADNA approach. *Computer Physics Communications*. 2007;176(8):507-521. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.01.005>.
7. Jézéquel F., Chesneaux J. M. CADNA: a library for estimating round-off error propagation. *Computer Physics Communications*. 2008;178(12):933-955. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2008.02.003>.
8. Chesneaux J.-M. The equality relations in scientific computing. *Numerical Algorithms*. 1994;7:129-143. <https://doi.org/10.1007/BF02140678>.
9. Chesneaux J.-M., Jézéquel F. Dynamical control of computations using the Trapezoidal and Simpson's rules. *Journal of Universal Computer Science*. 1998;4(1):2-10. <https://doi.org/10.3217/jucs-004-01-0002>.
10. Fariborzi Araghi M. A., Fallahzadeh A. Dynamical Control of accuracy using the stochastic arithmetic to estimate the solution of the ordinary differential equations via Adomian decomposition method. *Asian Journal of Mathematics and Computer Research*. 2016;8(2):128-135.
11. Fallahzadeh A., Fariborzi Araghi M. A., Discrete Adomian decomposition method for fuzzy convection-diffusion equation. *British Journal of Mathematics & Computer Science*. 2015;9(3):279-287. <https://doi.org/10.9734/BJMCS/2015/14727>.
12. Imani A. A., Ganji D. D., Rokni H. B., Latifizadeh H., Hesameddini E., Hadi Rafiee M. Approximate traveling wave solution for shallow water wave equation. *Applied Mathematical Modelling*. 2012;36(4):1550-1557. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.030>.
13. Noble P., Vila J.-P. Thin power-law film flow down an inclined plane: consistent shallow-water models and stability under large-scale perturbations // *Journal of Fluid Mechanics*. 2013;735:29-60. <https://doi.org/10.1017/jfm.2013.454>.
14. Noeiaghdam S., Fariborzi Araghi M. A. A novel algorithm to evaluate definite integrals by the Gauss-Legendre integration rule based on the stochastic arithmetic: application in the model of osmosis system // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2020;7(4):577-586. <https://doi.org/10.18280/mmep.070410>.
15. Noeiaghdam L., Noeiaghdam S., Sidorov D. Dynamical control on the homotopy analysis method for solving nonlinear shallow water wave equation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1847:012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1847/1/012010>.
16. Noeiaghdam S., Micula S., Nieto J. J. A novel tech-

nique to control the accuracy of a nonlinear fractional order model of COVID-19: application of the CESTAC method and the CADNA library. *Mathematics*. 2021;9(12):1321. <https://doi.org/10.3390/math9121321>.
 17. Noeiaghdam S., Sidorov D. Integral equations: theories, approximations, and applications. *Symmetry*. 2021;13(8):1402. <https://doi.org/10.3390/sym13081402>.
 18. Noeiaghdam S., Sidorov D., Wazwaz A.-M., Sidorov N., Sizikov V. The numerical validation of the Adomian decomposition method for solving Volterra integral equation with discontinuous kernel using the CESTAC method. *Mathematics*. 2021;9(3):260. <https://doi.org/10.3390/math9030260>.
 19. Noeiaghdam S., Sidorov D., Zamyshlyayeva A., Tynda A., Dreglea A. A valid dynamical control on the reverse osmosis system using the CESTAC method. *Mathematics*. 2021;9(1). <https://dx.doi.org/10.3390/math9010048>.
 20. Novin R., Fariborzi Araghi M. A., Mahmoudi Ya. A novel fast modification of the Adomian decomposition method to solve integral equations of the first kind with hypersingular kernels. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2018;343:619-634. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2018.04.055>.
 21. Vignes J., La Porte M. Error analysis in computing. In: *Information Processing*. Amsterdam; 1974, p. 610-614.

22. Yang Nan, Xu Wenlong, Zhang Kai, Zheng Bailin. Exact solutions to the space-time fractional shallow water wave equation via the complete discrimination system for polynomial method. *Results in Physics*. 2021;20(002):103728. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103728>.
 23. Zarei E., Noeiaghdam S. Advantages of the discrete stochastic arithmetic to validate the results of the Taylor expansion method to solve the generalized Abel's integral equation. *Symmetry*. 2021;13(8):1370. <https://doi.org/10.3390/sym13081370>.
 24. Urata N. Wave mode coupling and instability in the internal wave in aluminum reduction cells. In: Bearne G., Dupuis M., Tarcy G. (eds.). *Essential Readings in Light Metals*. Cham: Springer; 2016, p. 373-378. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48156-2_53.
 25. Kadhodabeigi M., Saboohi Y. A new wave equation for MHD instabilities in aluminum reduction cells. *Light Metals*. 2007;345-349.
 26. Radionov E. Yu., Nemchinova N. V., Tretiakov Ya. A. Magnetohydrodynamic processes modeling in electrolyzers at primary aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;7:112-120. (In Russ.).

Список источников

1. Abdelsalam U. M. Traveling wave solutions for shallow water equations // *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2017. Vol. 2. Iss. 1. P. 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2017.02.002>.
 2. Adeyemo O. D., Khalique C. M. Stability analysis, symmetry solutions and conserved currents of a two-dimensional extended shallow water wave equation of fluid mechanics // *Partial Differential Equations in Applied Mathematics*. 2021. Vol. 4. P. 100134. <https://doi.org/10.1016/j.padiff.2021.100134>.
 3. Aydin B., Kanoğlu U. New analytical solution for nonlinear shallow water-wave equations // *Pure and Applied Geophysics*. 2017. Vol. 174. P. 3209-3218. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1508-z>.
 4. Boháček J., Kharicha A., Ludwig A., Wu Menghuai. Shallow water model for horizontal centrifugal casting // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2012. Vol. 33. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/33/1/012032>.
 5. Bresch D., Desjardins B., Lin Chi-Kun. On some compressible fluid models: Korteweg, lubrication, and shallow water systems // *Communications in Partial Differential Equations*. 2003. Vol. 28. Iss. 3-4. P. 843-868. <https://doi.org/10.1081/PDE-120020499>.
 6. Scott N. S., Jézéquel F., Denis C., Chesneaux J. M. Numerical 'health check' for scientific codes: the CADNA approach // *Computer Physics Communications*. 2007. Vol. 176. Iss. 8. P. 507-521. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.01.005>.
 7. Jézéquel F., Chesneaux J. M. CADNA: a library for estimating round-off error propagation // *Computer Physics Communications*. 2008. Vol. 178. Iss. 12. P. 933-955.

<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2008.02.003>.
 8. Chesneaux J.-M. The equality relations in scientific computing // *Numerical Algorithms*. 1994. Iss. 7. P. 129-143. <https://doi.org/10.1007/BF02140678>.
 9. Chesneaux J.-M., Jézéquel F. Dynamical control of computations using the Trapezoidal and Simpson's rules // *Journal of Universal Computer Science*. 1998. Vol. 4. No. 1. P. 2-10. <https://doi.org/10.3217/jucs-004-01-0002>.
 10. Fariborzi Araghi M. A., Fallahzadeh A. Dynamical Control of accuracy using the stochastic arithmetic to estimate the solution of the ordinary differential equations via Adomian decomposition method // *Asian Journal of Mathematics and Computer Research*. 2016. Vol. 8. No. 2. 128-135.
 11. Fallahzadeh A., Fariborzi Araghi M. A., Discrete Adomian decomposition method for fuzzy convection-diffusion equation // *British Journal of Mathematics & Computer Science*. 2015. Vol. 9. Iss. 3. P. 279-287. <https://doi.org/10.9734/BJMCS/2015/14727>.
 12. Imani A. A., Ganji D. D., Rokni H. B., Latifizadeh H., Hesameddini E., Hadi Rafiee M. Approximate traveling wave solution for shallow water wave equation // *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 36. Iss. 4. P. 1550-1557. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.030>.
 13. Noble P., Vila J.-P. Thin power-law film flow down an inclined plane: consistent shallow-water models and stability under large-scale perturbations // *Journal of Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 735. P. 29-60. <https://doi.org/10.1017/jfm.2013.454>.
 14. Noeiaghdam S., Fariborzi Araghi M. A. A novel algorithm to evaluate definite integrals by the Gauss-Legendre integration rule based on the stochastic arithmetic: appli-

cation in the model of osmosis system // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2020. Vol. 7. Iss. 4. P. 577–586. <https://doi.org/10.18280/mmep.070410>.

15. Noeiaghdam L., Noeiaghdam S., Sidorov D. Dynamical control on the homotopy analysis method for solving nonlinear shallow water wave equation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1847. P. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1847/1/012010>.

16. Noeiaghdam S., Micula S., Nieto J. J. A novel technique to control the accuracy of a nonlinear fractional order model of COVID-19: application of the CESTAC method and the CADNA library // *Mathematics*. 2021. Vol. 9. Iss. 12. P. 1321. <https://doi.org/10.3390/math9121321>.

17. Noeiaghdam S., Sidorov D. Integral equations: theories, approximations, and applications // *Symmetry*. 2021. Vol. 13. Iss. 8. P. 1402. <https://doi.org/10.3390/sym13081402>.

18. Noeiaghdam S., Sidorov D., Wazwaz A.-M., Sidorov N., Sizikov V. The numerical validation of the Adomian decomposition method for solving Volterra integral equation with discontinuous kernel using the CESTAC method // *Mathematics*. 2021. Vol. 9. Iss. 3. P. 260. <https://doi.org/10.3390/math9030260>.

19. Noeiaghdam S., Sidorov D., Zamyshlyayeva A., Tynda A., Dreglea A. A valid dynamical control on the reverse osmosis system using the CESTAC method // *Mathematics*. 2021. Vol. 9. Iss. 1. <https://dx.doi.org/10.3390/math9010048>.

20. Novin R., Fariborzi Araghi M. A., Mahmoudi Ya. A novel fast modification of the Adomian decomposition

method to solve integral equations of the first kind with hypersingular kernels // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 343. P. 619–634. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2018.04.055>.

21. Vignes J., La Porte M. Error analysis in computing // *Information Processing*. Amsterdam, 1974. P. 610–614.

22. Yang Nan, Xu Wenlong, Zhang Kai, Zheng Bailin. Exact solutions to the space-time fractional shallow water wave equation via the complete discrimination system for polynomial method // *Results in Physics*. 2021. Vol. 20. Iss. 002. P. 103728. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103728>.

23. Zarei E., Noeiaghdam S. Advantages of the discrete stochastic arithmetic to validate the results of the Taylor expansion method to solve the generalized Abel's integral equation // *Symmetry*. 2021. Vol. 13. Iss. 8. P. 1370. <https://doi.org/10.3390/sym13081370>.

24. Urata N. Wave mode coupling and instability in the internal wave in aluminum reduction cells // *Essential Readings in Light Metals* / eds. G. Bearne, M. Dupuis, G. Tarcy. Cham: Springer, 2016. P. 373–378. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48156-2_53.

25. Kadkhodabeigi M., Saboohi Y. A new wave equation for MHD instabilities in aluminum reduction cells // *Light Metals*. 2007. P. 345–349.

26. Радионов Е. Ю., Немчинова Н. В., Третьяков Я. А. Моделирование магнитогидродинамических процессов в электролизерах при получении первичного алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 7. С. 112–120.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Laleh Noeiaghdam,

Postgraduate Student,
Department of Civil and Environmental Engineering,
Amirkabir University of Technology,
350, Hafez Ave, Valiasr Square, Tehran,
Iran 1591634311

Samad Noeiaghdam,

Senior Lecturer,
Industrial Mathematics Laboratory,
Baikal School of BRICS,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Senior Researcher of the Department of Applied
Mathematics and Programming,
South Ural State University,
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нойягдам Лале,

аспирант,
факультет гражданского строительства и охраны
окружающей среды,
Технологический университет Амиркабира,
1591634311, г. Тегеран, пр. Хафеза, 350,
пл. Валиасра, Иран

Нойягдам Самад,

старший преподаватель,
Лаборатория промышленной математики,
Байкальский институт БРИКС,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
старший научный сотрудник кафедры
прикладной математики и программирования,
Южно-Уральский государственный университет,
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия

Denis N. Sidorov,

Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Professor of RAS,
Head of the Laboratory of Industrial Mathematics,
Baikal School of BRICS,
Irkutsk National Research Technical University;
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Chief Researcher of the Department of Applied
Mathematics,
L. A. Melentiev Institute of Energy Systems of
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Сидоров Денис Николаевич,

доктор физико-математических наук, профессор РАН,
заведующий Лабораторией промышленной
математики,
Байкальский институт БРИКС,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
главный научный сотрудник
Отдела прикладной математики,
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article

The article was submitted 20.08.2021; approved after reviewing 29.09.2021; accepted for publication 22.10.2021.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.08.2021; одобрена после рецензирования 29.09.2021; принята к публикации 22.10.2021.



Научная статья

УДК 669.793

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-633-642>

Переработка формиатных растворов после выщелачивания красного шлама

Виктор Михайлович Сизяков¹, Борис Александрович Козырев²*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*¹ kafmet@spmi.ru² kozirev-48@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9926-8212>

Аннотация. Цель – определение показателей разработанной технологической схемы комплексной переработки красного шлама формиатным методом: извлечение компонентов, выход и состав продуктов при переработке пробы формиатного раствора, полученного после выщелачивания красного шлама. В эксперименте использовался красный шлам, образующийся при производстве глинозема на Уральском алюминиевом заводе. Полученные пробы формиатного раствора после выщелачивания шлама анализировались на спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Optima 8000, для измерения влажности использовался анализатор влажности Sartorius MA-30, для измерения массовой доли элементов в металлических и неметаллических образцах, находящихся в твердом, жидком и порошкообразном состояниях, применялся рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL 9800. Эксперименты велись при постоянном измерении и контроле значений pH при помощи pH-метра с функцией термокомпенсации. Проведены экспериментальные работы по сквозному извлечению ценных элементов из формиатных растворов выщелачивания красного шлама. Концентрат, содержащий Al, Sc, редкоземельные элементы, перерабатывается в самостоятельные продукты – оксид скандия и концентрат с редкоземельными металлами (после перевода алюминия в раствор путем его растворения в щелочи). Показано, что редкоземельные металлы и скандий концентрируются в твердой фазе, скандий затем селективно выщелачивается содобикарбонатным раствором с образованием водорастворимых карбонатных комплексов типа $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_4]^{5-}$ с карбонат-ионами CO_3^{2-} , HCO_3^- . В целом при использовании предлагаемой технологии извлечение скандия, редкоземельных элементов составило 98–99%; алюминия, формиатов кальция и натрия из производственного раствора – 99%. Конечными продуктами переработки формиатного раствора являются оксид скандия (с содержанием Sc_2O_3 99% масс.), концентрат редкоземельных элементов (с содержанием 56,1%). Показана принципиальная возможность переработки растворов, полученных после проточного выщелачивания красного шлама формиатным способом.

Ключевые слова: глиноземное производство, красный шлам, переработка отходов, скандий, муравьиная кислота, формиаты

Для цитирования: Сизяков В. М., Козырев Б. А. Переработка формиатных растворов после выщелачивания красного шлама // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 633–642. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-633-642>.

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Original article

Processing of formate solutions obtained from red mud leaching

Viktor M. Sizyakov¹, Boris A. Kozyrev²*Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia*¹ kafmet@spmi.ru² kozirev-48@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9926-8212>

Abstract. The paper determines the indicators of the developed process flow for the complex processing of red sludge via the formate method: recovery of components; yield and composition of products when processing a sample of formate solution obtained from red mud leaching. The conducted experiments used red mud generated in the production of alumina at the Urals Aluminium Smelter. The samples of formate solution obtained in the course of red mud leaching

were analyzed using an Optima 8000 ICP-OES Spectrometer, a Sartorius MA-30 Moisture Analyzer to measure moisture content, as well as an ARL 9800 XRF Spectrometer to ascertain the mass fraction of elements in metal and nonmetal specimens found in one of three states (solid, liquid, or powder). These experiments were performed while continuously measuring and monitoring pH values by means of a pH meter having a thermal compensation function. The performed experiments involved the total recovery of valuable elements from formate solutions produced during red mud leaching. A concentrate containing Al, Sc, and rare earth elements (REEs) was processed to produce scandium oxide and rare earth metal concentrate (after dissolving aluminum in an alkali). Rare earth metals and scandium were shown to concentrate in the solid phase; scandium was then selectively leached with a sodium bicarbonate solution to form water-soluble carbonate complexes $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_4]^{5-}$ having carbonate ions CO_3^{2-} and HCO_3^- . When using the proposed technology, the overall recovery of scandium and REEs amounts to 98–99%, whereas that of aluminum, calcium formate, and sodium formate from the produced solution reaches 99%. The processing of formate solution yields the following end products: scandium oxide (99 wt% Sc_2O_3) and REE concentrate (content of 56.1%). The paper demonstrates the possibility in principle to process solutions obtained from the flow-through leaching of red mud via the formate method.

Keywords: alumina production, red mud, waste processing, scandium, formic acid, formates

For citation: Sizyakov V. M., Kozyrev B. A. Processing of formate solutions obtained from red mud leaching. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):633-642. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-633-642>.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевая отрасль России развивается по пути совершенствования и оптимизации технологических процессов получения глинозема [1–3], первичного алюминия [4, 5], готовой алюминийсодержащей продукции [6–9]. Однако металлургическое производство сопровождается образованием значительного количества разнообразных твердых отходов [10].

Проблема накопления и утилизации красного шлама глиноземного производства хорошо известна, применяются разнообразные подходы для ее решения, большинство из которых были отвергнуты производственным сектором из-за их низкой эффективности [11–14]. В то же время масштабность проблемы и связанного с ней загрязнения окружающей среды только возрастает, что является следствием неуклонного повышения потребления и производства алюминия, которое практически утроилось за последние 20 лет и к настоящему времени составляет около 63 млн т в год (что в пересчете на годовой объем потребляемого глинозема составляет 119 млн т). При этом основным высококачественным сырьем для производства глинозема, используемого для получения первичного алюминия, остаются бокситы, объем добычи и переработки которых может оцениваться на уровне 250 млн т в год (с накоплением отходов их переработки щелочными способами в размере от 1 до 2,5 т на 1 т глинозема). Очевидно, что выбор рационального подхода для переработки красного шлама определяется не только имеющимися техни-

ческими возможностями, но также экономическими и экологическими факторами, действующей законодательной базой, регионом накопления отходов и др. [15–17]. С учетом значительного количества востребованных и достаточно ценных компонентов в составе красного шлама к настоящему моменту сложилось вполне четкое представление об этом виде отходов как рудном сырье техногенного происхождения, эффективность переработки которого связана с его комплексным использованием.

В этой связи заметный интерес представляет использование на начальных этапах переработки красного шлама муравьиной кислоты, что обеспечивает извлечение в раствор практически всех ценных компонентов (за исключением железа). Уже на этом этапе можно получать концентрат, отвечающий требованиям металлургической промышленности. В ходе отработки технологической последовательности операций и режимов их осуществления были определены стадии технологической схемы для последующего извлечения компонентов, перешедших в раствор, с получением соответствующих концентратов и продуктов (рис. 1, здесь РЗЭ – редкоземельные элементы). Это позволило:

- поставить в качестве основной задачи исследований определение показателей данной технологической схемы по извлечению компонентов, выходу и составу продуктов при сквозной переработке пробы формиатного раствора;

- подготовить информацию для составления материального баланса данного пере-

дела и определения его качественно-количественной схемы с последующей технико-экономической оценкой.

Проба формиатного раствора была получена путем выщелачивания красного шлама, принципиальная схема лабораторной установки по проточному выщелачиванию пред-

ставлена на рис. 2. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема представлена на рис. 3, были проведены опыты по разделению ценных компонентов из продукционных растворов формиатного выщелачивания красного шлама. Данное направление переработки растворов ранее не исследовалось.

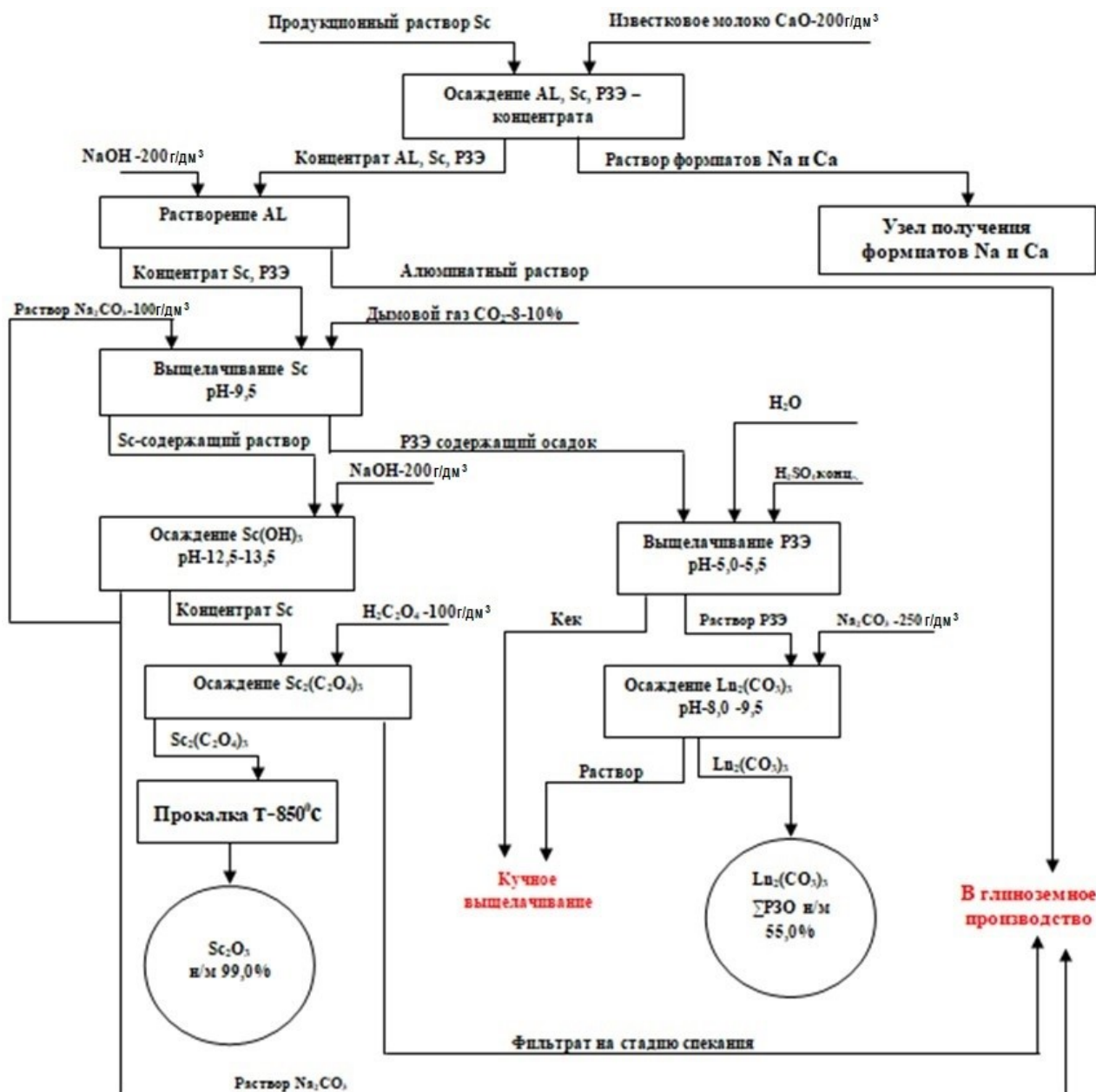


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема узла получения оксида скандия и концентрата редкоземельных элементов из продукционного раствора проточного выщелачивания

Fig. 1. Schematic flow diagram of the production unit of scandium oxide and rare earth element concentrate from the production solution of flow leaching

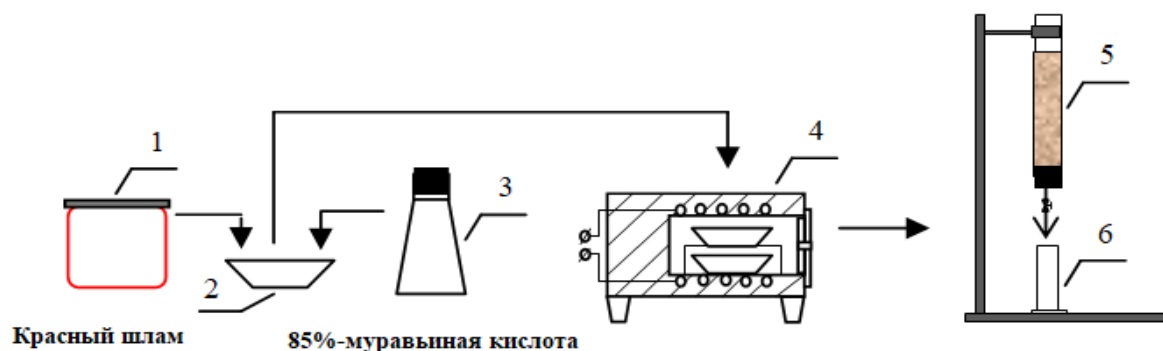


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки по проточному выщелачиванию:
 1 – проба красного шлама; 2 – фарфоровая чашка; 3 – 85% муравьиная кислота; 4 – сушильный шкаф;
 5 – колонка для проточного выщелачивания; 6 – цилиндр для сбора продукционного раствора
 Fig. 2. Schematic diagram of a laboratory installation for flow leaching: 1 – red mud sample;
 2 – porcelain cup; 3 – 85% formic acid; 4 – drying box; 5 – column for flow leaching; 6 – cylinder for product solution collection

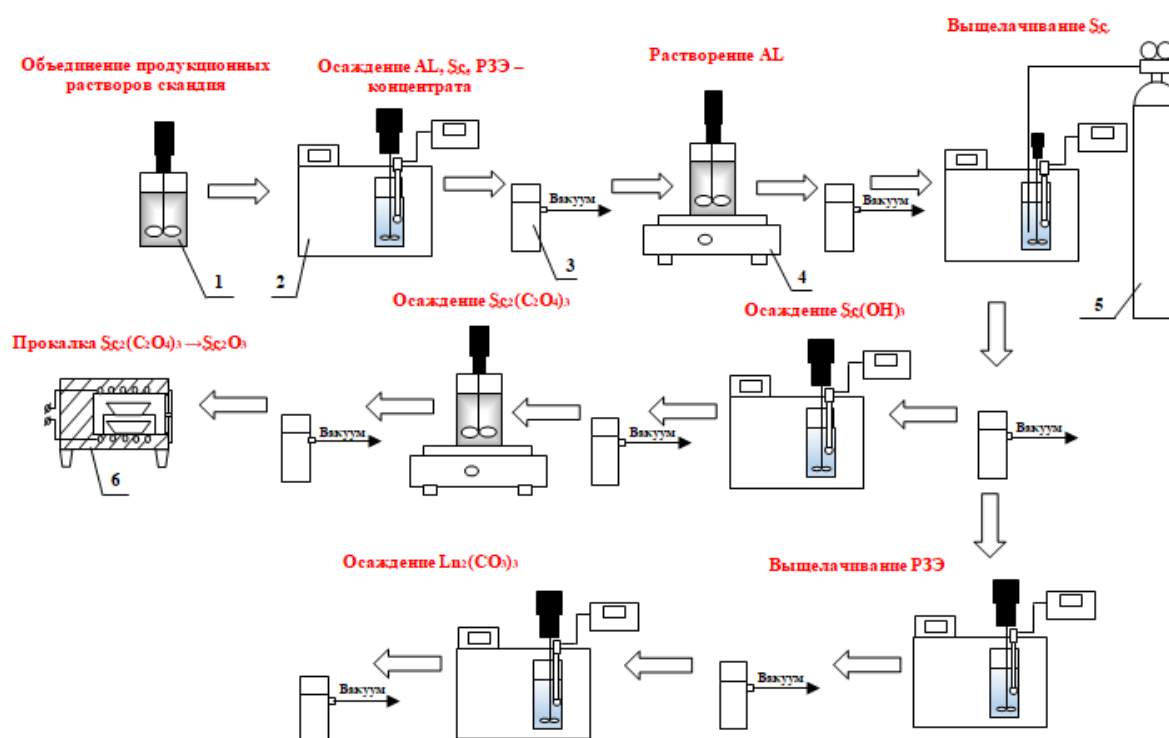


Рис. 3. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема переработки формиатных растворов после выщелачивания красного шлама с получением оксида скандия и концентрата редкоземельных элементов:
 1 – реактор для выщелачивания; 2 – термостат; 3 – вакуумный фильтр; 4 – электроплитка; 5 – газовый баллон с CO_2 ; 6 – муфельная печь

Fig. 3. Basic process flow diagram of formate solution processing from red mud leaching with obtaining of scandium oxide and concentrate of rare earth elements: 1 – leaching reactor; 2 – thermal bath; 3 – vacuum filter; 4 – electric hot plate; 5 – CO_2 gas cylinder; 6 – muffle furnace

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Навеску красного шлама, образующегося при получении глинозема на Уральском

алюминиевом заводе (УАЗе), смешивали с 85% муравьиной кислотой в фарфоровой чашке. Количество реагента рассчитывалось исходя из реакции взаимодействия с основ-

ными извлекаемыми элементами. Полученную смесь выдерживали в сушильном шкафу при температуре 110°C в течение 4 ч. Далее усредняли фракционный состав материала, доизмельчая крупные куски шлама; загружали подготовленную смесь в стеклянную колонку, в нижней части которой имелось встроенное дренажное устройство, позволяющее задерживать частицы красного шлама и пропускать через себя раствор. Прошедший через слой красного шлама раствор собирали в мерный цилиндр и анализировали на спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Optima 8000. Для измерения влажности использовался анализатор влажности Sartorius MA-30, для измерения массовой доли элементов в металлических и неметаллических образцах, находящихся в твердом, жидком и порошкообразном состояниях, использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL 9800. Опыты проводились при постоянном измерении и контроле значений pH, для этого был задействован pH-метр с функцией термокомпенсации (портативный pH-метр / милливольтметр / термометр HANNA HI 83141). Далее полученные производственные растворы перерабатывали по схеме, представленной на рис. 1. Лабораторная установка получения оксида скандия и концентрата РЗЭ из производственных растворов формиатного выщелачивания красного шлама отображена на рис. 3.

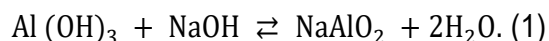
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Производственный раствор проточного выщелачивания красного шлама имел состав, представленный в табл. 1.

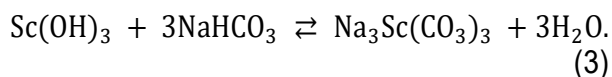
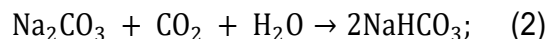
Данный химический состав, который формируется в результате протекания следующих химических реакций взаимодействий

муравьиной кислоты с минеральными компонентами красного шлама (сырья):

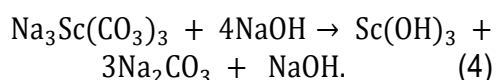
Растворение алюминия:



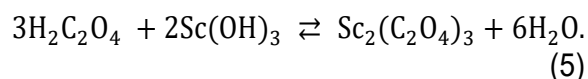
Выщелачивание скандия:



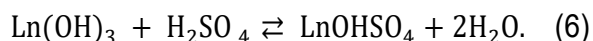
Осаждение Sc(OH)₃:



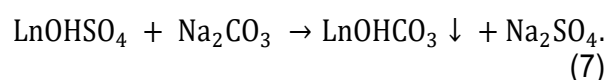
Получение оксалата скандия:



Выщелачивание РЗЭ:



Осаждение РЗЭ:

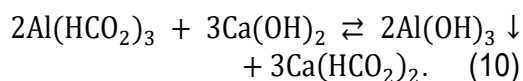
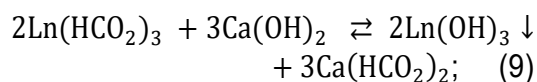
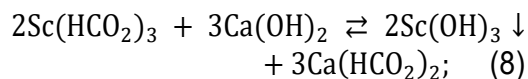


Производственный раствор в термостате при температуре 60°C нейтрализовали известковым молоком (с концентрацией по CaO 200 г/дм³) до pH = 6,5, на нейтрализацию было израсходовано 265 мл реагента. Ниже представлены реакции нейтрализации:

Таблица 1. Состав производственного раствора после выщелачивания красного шлама

Table 1. Composition of production solution after red mud leaching

Поток	Концентрация, г/дм ³								Примечания
	Sc ₂ O ₃	Σредкоземельных элементов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	
Производственный раствор	0,13	1,25	0,45	22,9	0,34	0,01	48,7	34,8	V _{раствора} = 1,4 л



Полученную пульпу после выдержки при 60°C в течение 1 ч отфильтровали. Осадок, содержащий Al, Sc, РЗЭ, на фильтре промыли водой, результаты анализа концентрата и маточника осаждения (раствора формиатов натрия и кальция) представлены в табл. 2.

Раствор формиатов натрия и кальция перерабатывается на индивидуальные соли выпаркой раствора, формиаты кальция при повышении концентрации формиата натрия полностью переходят в твердую фазу, натриевая соль муравьиной кислоты накапливается в растворе. Концентрат Al, Sc, РЗЭ перерабатывается в оксид скандия и концен-

трат РЗЭ после перевода алюминия в раствор путем его растворения в щелочи. Редкоземельные металлы и скандий концентрируются в твердой фазе, скандий затем селективно выщелачивается из твердой фазы содо-бикарбонатным раствором с образованием водорастворимых карбонатных комплексов типа $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_4]^{5-}$ с карбонат-ионами CO_3^{2-} , HCO_3^- . Концентрация реагента по Na_2O составляла 35–55 г/дм³.

Выделенный из продукционного раствора концентрат Al, Sc, РЗЭ (см. табл. 2) перерабатывается по описанной выше схеме в продукты, состав которых представлен в табл. 3.

Из скандийсодержащего раствора после добавления раствора щелочи до pH = 12,5–13,5 выделяли гидроксид скандия, который после отделения от раствора фильтрацией смешивался с раствором щавелевой кислоты при температуре 80–90°C с получением оксалата скандия по реакции (5), кислоту брали с избытком 10% от стехиометрически необходимого количества.

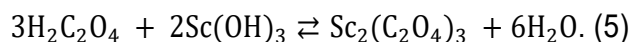
Таблица 2. Результаты анализа продуктов осаждения
Table 2. Analysis results of precipitation products

Продукт	Состав продуктов								Примечания
	Sc ₂ O ₃	Σредкоземельных элементов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	
Концентрат Al, Sc, РЗЭ, %	0,3	2,89	1,04	52,9	0,79	0,023	0,7	0,3	m _{вл} * = 173,2 г, W _{H₂O} ** = 65,0%
Маточник осаждения, г/дм ³	<0,001	<0,001	0,0001	0,003	0,0001	0,002	70,9	28,5	V _{маточн.} *** = 1,7 л

* – масса влажной пробы, г; ** – влажность пробы, %; *** – объем маточника, л.

Таблица 3. Результаты анализа продуктов, полученных при переработке концентрата AL, Sc, редкоземельных элементов
Table 3. Analysis results of products obtained under processing of AL, Sc, rare earth element concentrate

Продукт	Химический состав продуктов								Примечания
	Sc ₂ O ₃	Σредкоземельных элементов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	
Концентрат Sc, РЗЭ, %	2,0	18,9	6,8	34,7	5,25	0,15	4,6	1,3	m _{вл} = 32,9 г, W _{H₂O} = 72,0%
Алюминатный раствор, г/дм ³	<0,001	<0,001	0,09	115,6	0,002	<0,01	0,02	155,0	V _{раствора} = 0,25 л
Sc-содержащий раствор, г/дм ³	0,53	0,01	0,003	0,019	0,001	0,015	0,001	40,0	V _{раствора} = 0,3 л
Осадок, содержащий РЗЭ, %	0,21	19,1	6,79	35,2	5,31	0,16	4,65	0,5	m _{вл} = 43,3 г, W _{H₂O} = 79,0%



Полученный оксалат скандия прокачивали при 850⁰С (для удаления влаги) с получением готового продукта – оксида скандия. Состав продуктов, получаемых при переработке скандийсодержащего раствора в оксид скандия, представлен в табл. 4.

Осадок, содержащий РЗЭ, распульповывали в воде, и в полученную пульпу вводили серную кислоту. Процесс селективного выщелачивания РЗЭ контролировали по показаниям рН-метра, область рН перехода РЗЭ в раствор лежала в интервале рН = 5,0–5,5.

После отделения раствора от осадка, в котором сосредоточились все попутные примесные соединения, его нейтрализовали раствором соды до рН = 8,0–9,5, редкоземельные металлы переходили в осадок в виде карбонатных солей, которые после промывки и сушки представляли собой концентрат редкоземельных металлов.

Состав продуктов, получаемых при переработке осадка, содержащего РЗЭ, представлен в табл. 5.

Извлечение скандия и редкоземельных

металлов из продукционного раствора формиатного выщелачивания красного шлама составило 98–99%, алюминия, кальция и натрия – 99%. Предлагаемая технология переработки данных формиатных растворов является новым технологическим решением, ранее не исследованным. Красный шлам перерабатывали либо щелочными способами [18, 19], либо с использованием неорганических кислот [20, 21], либо пирометаллургическими методами [15, 22]. На данную технологию на сегодняшний день уже готов патент на изобретение.

В предлагаемой технологии при сопоставимых затратах на энергию, оборудование, реагенты и материалы по сравнению с известными разработками [23, 24] из растворов после выщелачивания кроме скандия получают и другие ценные продукты с высокой добавочной стоимостью: концентрат РЗЭ, алюминий, формиаты кальция и натрия. Комплексный подход к переработке формиатных растворов является экономически целесообразным, что может существенно повысить технико-экономические показатели предложенной технологии.

Таблица 4. Результаты анализа продуктов, полученных при переработке скандийсодержащего раствора в оксид скандия

Table 4. Analysis results of products obtained under processing of scandium-containing solution into scandium oxide

Продукт	Состав продуктов								Примечания
	Sc ₂ O ₃	Σредкоземельных элементов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	
Концентрат Sc, %	45,2	0,5	0,03	1,7	0,05	1,29	0,06	10,3	m _{вл} = 3,5 г, W _{H₂O} = 90,0%
Маточник осаждения оксалата, г/дм ³	0,10	0,05	0,001	0,06	0,002	0,045	0,002	0,36	V _{раствора} = 0,1 л
Оксид скандия Sc ₂ O ₃ , %	99,0	0,90	0,001	0,0024	0,008	0,002	0,0016	0,06	–

Таблица 5. Результаты анализа продуктов, полученных при переработке содержащего осадка редкоземельных элементов

Table 5. Analysis results of products obtained under processing of sediment containing rare earth elements

Продукт	Химический состав продуктов								Примечания
	Sc ₂ O ₃	Σредкоземельных элементов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	
Концентрат РЗЭ, %	0,5	56,1	0,03	0,007	0,05	0,009	0,06	0,3	m _{вл} = 5,16 г, W _{H₂O} = 40,0%
Маточник осаждения РЗЭ, г/дм ³	<0,001	<0,001	0,009	0,002	0,002	<0,01	0,001	5,0	V _{раствора} = 0,5 л
Нерастворимый осадок в отвал, %	0,014	0,2	8,83	45,7	6,86	0,21	6,16	0,6	m _{вл} = 12,7 г, W _{H₂O} = 45,0%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана принципиальная возможность переработки продукционных растворов, полученных после проточного выщелачивания красного шлама формиатным способом, в высоколиквидные продукты с высокой добавочной стоимостью. Выполнено описание химических процессов, осуществляемых на основных технологических переделах комплексного способа переработки растворов

после проточного выщелачивания красного шлама формиатным методом. Разработана технологическая схема переработки продукционных растворов формиатного выщелачивания красного шлама с получением товарных продуктов. Извлечение из продукционного раствора скандия, редкоземельных металлов составило 98–99%, алюминия, формиатов кальция и натрия – 99%.

Список источников

1. 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>.
2. Власов А. А., Сизяков В. М., Бажин В. Ю. Использование глинозема песчаного типа для производства алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 6. С. 111–118. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-111-118>.
3. Александров А. В., Немчинова Н. В. Расчет ожидаемой экономической эффективности производства алюминия за счет увеличения применения глинозема отечественного производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 408–420. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>.
4. 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/IJR.2016.47.113>.
5. Gorlanov E. S., Bazhin V. Yu., Vlasov A. A. Electrochemical borating of titanium-containing carbographite materials // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017. Vol. 2017. No. 6. P. 489–493. <https://doi.org/10.1134/S003602951706009X>.
6. 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>.
7. Петлин И. В., Малютин Л. Н. Технология комплексной переработки фторсодержащих отходов алюминиевой промышленности с целью получения фторида водорода // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2014. Т. 7. № 2. С. 24–31.
8. Гуляев А. В., Гавриленко Л. В., Баранов А. Н., Ножко С. И. Утилизация твердых углеродсодержащих отходов на алюминиевом заводе, оснащённом электролизерами с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом // *Экология и промышленность России*. 2017. Т. 21. № 5. С. 8–10. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-5-8-10>.
9. Немчинова Н. В., Сомов В. В., Тютрин А. А. Определение оптимальных параметров выщелачивания фтора из угольной части отработанной футеровки демонтированных электролизеров производства алюминия // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 544–549. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.544>.
10. Belskii S. S., Chantsev M. V. Industrial production technology for aluminium paste // *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. P. 847–852. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.847>.
11. Подгородецкий Г., Ширяева Е., Горбунов В., Козлова О. Проблема эффективной переработки красных шламов, поиск решений // *Экология и промышленность России*. 2015. № 12. Т. 19. С. 46–53. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-12-46-53>.
12. Трушко В. Л., Утков В. А., Бажин В. Ю. Актуальность и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // *Записки Горного института*. 2017. Т. 227. С. 547–553. <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.547>.
13. Утков В. А., Сизяков В. М. Современные вопросы металлургической переработки красных шламов // *Записки Горного института*. 2013. Т. 202. С. 39–43.
14. Khairul M. A., Zanganeh J., Moghtaderi B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud // *Resources Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 141. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.006>.
15. Зиновьев Д. В., Грудинский П. И., Дюбанов В. Г., Коваленко Л. В., Леонтьев Л. И. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 11. С. 843–858. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-843-858>.
16. Wang Shaohan, Jin Huixin, Deng Yong, Xiao Yuandan. Comprehensive utilization status of red mud in China: a critical review // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 289. P. 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125136>.
17. Mohapatra A., Bose P., Pandit S. S., Kumar S., Alex T. C. Bulk utilization of red mud in geopolymer based products // *Advances in Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 86–91. <https://doi.org/10.32732/ase.2020.12.2.86>.
18. Пат. № 2245371, Российская Федерация, С2,

C21B3/04. Способ переработки красного шлама глиноземного производства / Е. А. Коршунов, С. П. Буркин, Ю. Н. Логинов, И. В. Логинова, Е. А. Андриякова, В. С. Третьяков; заявитель и патентообладатель ООО «ДАТА-ЦЕНТР». Заявл. 03.02.2003; опубл. 27.01.2005. Бюл. № 3.

19. Пат. № 2692709, Российская Федерация, С2, С22В 59/00. Способ извлечения скандия из красного шлама глиноземного производства / А. Б. Козырев, О. В. Петракова, А. Г. Сусс, С. Н. Горбачев, А. В. Панов; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ. Инженерно-технологический центр». Заявл. 21.06.2017; опубл. 26.06.2019. Бюл. № 18.

20. Xiao Junhui, Peng Yang, Ding Wei, Chen Tao, Zou Kai, Wang Zhen. Recovering scandium from scandium rough concentrate using roasting-hydrolysis-leaching process // *Green Separation and Extraction Processes*. 2020. Vol. 8. No. 3. P. 365–380.
<https://doi.org/10.3390/pr8030365>.

21. Иванков С. И., Скобелев К. Д., Шубов Л. Я., Доронкина И. Г. Систематизация многотоннажных отходов и запатентованные технологии их утилизации и перера-

ботки // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. Обзорная информация/ Всероссийский институт научной и технической информации РАН. М.: Изд-во ВИНТИ РАН, 2020. Вып. 1. С. 2–118.
<https://doi.org/10.36535/0869-1002-2020-01-1>.

22. Скобелев Д. О., Марьев В. А., Шубов Л. Я., Иванков С. И., Доронкина И. Г. Отходы горно-металлургической отрасли: систематизация технологических решений экологических задач (Часть II) // *Экологические системы и приборы*. 2019. № 1. С. 12–37. <https://doi.org/10.25791/esip.01.2019.401>.

23. Киров С. С., Хайруллина Р. Т., Сусс А. Г., Александров П. В. Осаждение Sc-концентрата из растворов карбонатно-бикарбонатного выщелачивания известковым молоком с последующей серноокислотной перемывкой Ca – Sc-осадков // *Цветные металлы*. 2017. № 1. С. 46–52. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.08>.

24. Пягай И. Н. Блочная переработка бокситовых шламов глиноземного производства // *Цветные металлы*. 2016. № 7. С. 43–51.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2016.07.05>.

References

1. 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;2:11-16.
<https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>.

2. Vlasov A. A., Sizyakov V. M., Bazhin V. Yu. Use of sandy alumina for aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(6):111-118. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-111-118>.

3. Aleksandrov A. V., Nemchinova N. V. Calculation of the expected economic efficiency of aluminium production by increasing the use of domestic alumina. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):408-420. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>.

4. Bazhin V. U., Smol'nikov A. D., Petrov P. A. Concept of energy efficiency aluminum production "Electrolysis 600+". *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*. 2016;5(3):37-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.113>.

5. Gorlanov E. S., Bazhin V. Yu., Vlasov A. A. Electrochemical borating of titanium-containing carbographite materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017;2017(6):489-493.
<https://doi.org/10.1134/S003602951706009X>.

6. Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Barauskas A. E. 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>.

7. Petlin I. V., Malyutin L. N. Hydrogen fluoride producing

technology from aluminum industry fluorine-containing waste products. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2014;7(2):24-31. (In Russ.).

8. Gulyaev A. V., Gavrilenko L. V., Baranov A. N., Nozhko S. I. Recovery of solid carbonaceous wastes at an aluminium plant equipped with electrolyte tanks with self-baking anode with an upper current lead. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(5):8-10. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-5-8-10>.

9. Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Somov V. V. Determination of optimal fluorine leaching parameters from the coal part of the waste lining of dismantled electrolytic cells for aluminum production. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;239:544-549. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.544>.

10. Belskii S. S., Chantsev M. V. Industrial production technology for aluminium paste. *Defect and Diffusion Forum*. 2021;410:847-852.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.847>.

11. Podgorodetsky G., Shiryayeva E., Gorbunov V., Kozlova O. A Problem of efficient red mud processing, search for solutions. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(12):46-53. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-12-46-53>.

12. Trushko V. L., Utkov V. A., Bazhin V. Y. Topicality and possibilities for complete processing of red mud of aluminous production. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2017;227:547-553.
<https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.547>.

13. Utkov V. A., Sizyakov V. M. Modern issues of metallurgical processing of red mud. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2013;202:39-43. (In Russ.).

14. Khairul M. A., Zanganah J., Moghtaderi B. The com-

position, recycling and utilisation of Bayer red mud. *Resources Conservation and Recycling*. 2019;141:483-498. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.006>.

15. Zinoveev D. V., Grudinskii P. I., Dyubnov V. G., Kovalenko L. V., Leont'ev L. I. Global recycling experience of red mud – A review. Part I: pyrometallurgical methods. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiyazvestiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(11):843-858. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-843-858>.

16. Wang Shaohan, Jin Huixin, Deng Yong, Xiao Yuandan. Comprehensive utilization status of red mud in China: a critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2021;289:125-136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125136>.

17. Mohapatra A., Bose P., Pandit S. S., Kumar S., Alex T. C. Bulk utilization of red mud in geopolymer based products. *Advances in Sciences and Engineering*. 2020;12(2):86-91. <https://doi.org/10.32732/ase.2020.12.2.86>.

18. Korshunov E. A., Burkin S. P., Loginov Yu. N., Logina I. V., Andryukova E. A., Tret'yakov V. S. *Processing method of red mud of alumina production*. Patent RF, no. 2245371; 2005. (In Russ.).

19. Kozyrev A. B., Petrakova O. V., Suss A. G., Gorbachev S. N., Panov A. V. *Method of scandium extraction from red mud of alumina production*. Patent RF, no. 2692709; 2017. (In Russ.).

20. Xiao Junhui, Peng Yang, Ding Wei, Chen Tao, Zou Kai, Wang Zhen. Recovering scandium from scandium

rough concentrate using roasting-hydrolysis-leaching process. *Green Separation and Extraction Processes*. 2020;8(3):365-380. <https://doi.org/10.3390/pr8030365>.

21. Ivankov S. I., Skobelev K. D., Shubov L. Ya., Doronkina I. G. Systematization of large-tonnage waste and patented technologies for their utilization and recycling. In: *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchej sredy. Obzornaya informatsiya/ Vserossijskij institut nauchnoj i tekhnicheskoy informatsii RAN = Scientific and technical aspects of environmental protection. Overview information*. Moscow: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences; 2020, no. 1, p. 2-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2020-01-1>.

22. Skobelev D. O., Maryev V. A., Shubov L. Ya., Ivankov S. I., Doronkina I. G. Waste from the mining and metallurgy industry: the systematization of the technological solutions of the ecological tasks. Part II. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*. 2019;1:12-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/esip.01.2019.401>.

23. Kirov S. S., Khayrullina R. T., Suss A. G., Aleksandrov P. V. Scandium concentrate precipitation from carbonate-bicarbonate solutions with calcium hydroxide. *Tsvetnye Metally*. 2017;1:46-52. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.08>.

24. Pyagay I. N. The block processing of red mud of alumina production. *Tsvetnye Metally*. 2016;7:43-51. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.07.05>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сизяков Виктор Михайлович,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Козырев Борис Александрович,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.09.2021; одобрена после рецензирования 17.09.2021; принята к публикации 26.09.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor M. Sizyakov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Metallurgy,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Boris A. Kozyrev,

Postgraduate Student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 01.09.2021; approved after reviewing 17.09.2021; accepted for publication 26.09.2021.

Обзорная статья

УДК 669.48:669.53

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>

Обзор методов переработки пылей электродуговой плавки

Юлия Игоревна Топоркова¹, Дана Блудова^{2✉},
Сергей Владимирович Мамяченков³, Ольга Сергеевна Анисимова⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,

г. Екатеринбург, Россия

¹ yulia.toporkova@gmail.com

² bludova.finans@gmail.com

³ s.v.mamiachenkov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6070-8746>

⁴ osanis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1649-1177>

Аннотация. Цель – провести аналитический обзор способов переработки техногенного отхода черной металлургии – пыли электродуговой плавки – с определением ежегодных объемов выбросов данной пыли и конкретизацией источника каждого отдельного компонента пыли. Сравнительный анализ проводился на основе обзора научных публикаций, посвященных вопросу переработки пыли электродуговой плавки, за последние 20 лет. Рассмотрены основные способы переработки пыли для извлечения железа, цинка и других металлов с применением действующих технологий: пиро-, гидрометаллургических и их комбинаций. Показано, что на сегодняшний день разработано достаточно много различных высокотемпературных технологий, позволяющих эффективно перерабатывать цинкостержащие пыли (в частности, вельц-процесс и его производные). Однако многие из этих технологий остались на стадии разработки в силу различных причин (требуют огромных капитальных вложений, ненадежны, энергос затратны и имеют невысокую производительность). Показано, что гидрометаллургические процессы являются безопасными в экологическом плане, обеспечивают селективность по извлечению ценных компонентов и возможность регулирования технологических параметров. Подбирая растворитель (кислотный или щелочной), можно селективно извлекать необходимый металл из пыли, и данная технология будет рентабельна даже с низким содержанием ценного компонента. Описаны способы обработки изучаемой металлургической пыли неорганическими, органическими кислотами и растворами на основе аммиака. Рассмотрены как традиционные решения по переработке пыли электродуговой плавки в промышленных масштабах, так и последние лабораторные разработки, с недавнего времени внедренные на заводах по производству цинка (их особенности, преимущества и недостатки). Названы технологии, позволяющие извлечь ценные компоненты из пыли и вернуть их в производственный цикл.

Ключевые слова: черная металлургия, пыль электродуговой плавки, гидрометаллургическая переработка, гидрометаллургические способы переработки

Для цитирования: Топоркова Ю. И., Блудова Д., Мамяченков С. В., Анисимова О. С. Обзор методов переработки пылей электродуговой плавки // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 643–680. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>.

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Review article

A review of processing methods for electric arc furnace dust

Yulia I. Toporkova¹, Dana Bludova^{2✉}, Sergey V. Mamyachenkov³, Olga S. Anisimova⁴

Ural Federal University named after the first President of Russia Boris N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ yulia.toporkova@gmail.com

² bludova.finans@gmail.com

³ s.v.mamiachenkov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6070-8746>

⁴ osanis@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1649-1177>

Abstract. The work presents an analytical review of processing methods for industrial waste from the ferrous industry, namely, electric arc furnace dust. The annual emissions of this dust and the source of each dust component are determined. Scientific works on the topic of processing electric arc furnace dust published over the past 20 years are compared and analysed. The major methods for dust processing to recover iron, zinc and other metals include pyro- and hydrometallurgical techniques and their combinations. To date, several high-temperature technologies have been developed that allow zinc-containing dust to be efficiently processed (in particular, the Waelz process and secondary processes). However, many of these technologies have remained at the development stage for various reasons (either requiring considerable capital investments, or being unreliable, energy-intensive and inefficient). It is shown that hydrometallurgical processes are environmentally safe and selective to valuable components and allow technological parameters to be controlled. By selecting a suitable solvent (acidic or alkaline), the required metal can be selectively extracted from dust. In addition, such a technology will be cost-effective even under low contents of the extracted component. Approaches to processing metallurgical dust with inorganic and organic acids and ammonia-based solutions are described. Both conventional processing of electric arc furnace dust on an industrial scale and the laboratory developments recently introduced at zinc production plants (their features, advantages and disadvantages) are discussed. Technologies that allow valuable components in the dust to be extracted and returned to the production cycle are identified.

Keywords: ferrous metallurgy, dust of electric arc melting, pyrometallurgical processing, hydrometallurgical processing methods

For citation: Toporkova Yu. I., Bludova D., Mamyachenkov S. V., Anisimova O. S. Review of electric arc melting dust processing methods. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):643-680. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>.

ВВЕДЕНИЕ

Неуклонный рост потребления цинка и длительное развитие мирового горно-металлургического комплекса на основе модели экстенсивного недропользования неизбежно способствовало истощению запасов разрабатываемых богатых месторождений и образованию значительных объемов техногенных отходов.

Россия является традиционным производителем цинка (250 тыс. т/год рафинированного металла), однако рост его производства ограничен низким качеством отечественных колчеданно-полиметаллических руд. Поэтому перспективные задачи по вводу новых мощностей и модернизации технологических процессов должны обеспечиваться расширением и реструктуризацией минерально-сырьевой базы цинка, в том числе за счет вовлечения в переработку цинкосодержащего техногенного сырья.

Процессы черной металлургии характеризуются формированием большого количества отходов. В среднем на 1 т выплавленной стали в печах переменного тока образуется около 25–30 кг пыли; учитывая высокую производительность сталепромышленных заводов, мировые запасы пыли составляют порядка 5,6 млрд т. В Российской Федерации – 0,7 млн т пыли образуется ежегодно, при ее складиро-

вании наносится вред окружающей среде и теряется до, соответственно, тыс. т/год: 800 железа, 500 цинка и 150 свинца. Такое количество ценного сырья может частично покрывать потребность в сырье предприятий черной и цветной металлургии [1].

Состав пылей сталеплавильной промышленности отличается в зависимости от применяемой технологии, в ходе которой она образуется, и от состава исходного сырья. Диапазон содержания цинка в пылях достаточно широк, колеблется от 2 до 25%, в некоторых случаях содержание по цинку достигает 40% [2]. Цветные металлы и сплавы из вторичного сырья играют важную роль в общем балансе производства и потребления цветных металлов в нашей стране: их доля по отношению к общему объему производства составляет около 25%.

По данным «International lead and zinc study group»⁵ мировое производство и потребление цинка и свинца ежегодно растет, и добыча цинковых руд не успевает обеспечить необходимую в них потребность. Во многих странах проводятся исследовательские работы по поиску наилучших технологий переработки вторичных ресурсов. Задача усложняется переменным составом и металлургическими свойствами пыли. Каждому металлургическому предприятию приходится

⁵ International Lead and Zinc Study Group [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ilzsg.org/static/backgroundinfo.aspx?from=1> (18.03.2021).

разрабатывать технологии согласно характеристикам образующихся отходов.

В настоящее время извлечение цинка из отходов сталеплавильного производства осуществляется в незначительном масштабе и преимущественно пирометаллургическими методами, характеризующимися высоким расходом восстановителя, получением низкокачественных товарных продуктов и дополнительным загрязнением окружающей среды. Поэтому вовлечение ценных компонентов металлургической пыли в производство – актуальная задача для индустриально развитых стран мира. Учитывая отмеченное, во всех странах с развитой металлургией непрерывно ведутся работы по возвращению мелких отходов в производство металлургических предприятий. Лидерами здесь являются Япония, США, Германия и Англия. Ведутся работы в Италии, Франции, Испании, Канаде и в последнее время весьма интенсивно в Китае.

Но переработка такого типа отходов требует разработки специальных технологий вследствие содержащихся в пыли вредных примесей, а возвращение ее в производство зачастую невозможно из-за нежелательных компонентов шихты для производства агломерата и чугуна.

По масштабам негативного воздействия на экологию черная металлургия занимает одно из ведущих мест. За время существования металлургических заводов рядом с ними накопилось огромное количество шлакопылевых отвалов. Давно известно, что даже старые, уже выведенные из эксплуатации, отвалы плохо влияют на атмосферу, гидросферу и почвенный покров окружающей местности, а через них – на состояние флоры, фауны и здоровье людей. Поэтому ликвидация шлакопылевых отвалов сегодня стала одной из самых насущных задач охраны окружающей среды. Извлечение цинка и железа из сталеплавильной пыли позволит не только сэкономить энергию, необходимую для производства этих металлов из их руд, но и сохранить природные ресурсы.

В Федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО) (каталог отходов, образующихся на территории Российской Фе-

дерации) приведены агрегатное состояние отхода или его физическая форма, опасные свойства или их комбинация и класс опасности отхода. В ФККО также входят отходы металлургического производства, в том числе пыль. Уловленная пыль, образующаяся при производстве чугуна и стали, имеет IV класс опасности. Анализ состава и свойств сталеплавильной пыли является одной из главных задач для определения ее воздействия на окружающую среду и организм человека.

Захоронение пыли сталеплавильных цехов по ряду причин является бесперспективным. Во-первых, из всех мелких отходов металлургического производства сталеплавильные пыли представляют наибольшую угрозу окружающей среде. Это связано с их мелкодисперсным характером – до 80% частиц размером менее одного микрона. Они легко выносятся в атмосферу и вымываются водой, загрязняя почву. К тому же пыль и шламы газоочисток сталеплавильных цехов содержат многократно превышающую предельно допустимую концентрацию, чрезвычайно токсичные и хорошо растворимые в воде цианиды (соли синильной кислоты), радониды и другие вредные для человека соединения и элементы, такие как Pb, Cd, As, F и Cr (IV). Поэтому захоронение требует специальной, дорогостоящей дезактивации этих отходов. Затраты на это, по данным зарубежной практики, составляют более 100 долл/т отходов, а в Японии, учитывая дефицит земли, 200 долл/т отходов. В ряде стран захоронение без дезактивации пыли и шламов металлургических предприятий запрещено законом [3]. Агентством по охране окружающей среды (EPA, США) в 1995 г. пыль электросталеплавильных цехов была отнесена к опасным отходам класса K061, требующим специальной обезвреживающей обработки.

Различным аспектам металлургической переработки цинксодержащего первичного и вторичного сырья посвящены исследования известных отечественных и зарубежных ученых, среди которых следует выделить работы С. С. Набойченко, Я. М. Шнеерсона, П. А. Козлова, А. А. Перетрутова, А. Стефанова, Дж. Дж. Аромаа, П. Аустодаки, М. А. Пашке-

вич, однако значительный круг вопросов, связанный с проблемами извлечения цинка из разнотипных сырьевых материалов с высоким содержанием его ферритных форм, остается недостаточно изученным.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значимое содержание ценных компонентов, особенно цинка и железа, в пыли электродуговой плавки (ЭДП) делает ее ценным, и в то же время сложным для переработки сырьем. Целью настоящего обзора был анализ имеющихся отечественных и зарубежных источников, описывающих переработку пыли электродуговой плавки и результаты, полученные в ходе исследований, как относительно извлечения цинка, так и примеры успешно внедренных технологий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика пыли электродуговой плавки как вторичного сырья. Дуговая сталеплавильная печь (ДСП), как и любой металлургический агрегат, является источником пылегазовых выбросов. Несмотря на общие закономерности образования пыли при производстве стали в разных агрегатах, формирование пыли в ДСП имеет свои особенности. Максимальных значений выбросы достигают в периоды воздействия электрических дуг на ванну и продувки ванны кислородом. Небольшое количество пыли образуется в период расплавления чистой и крупногабаритной шихты. Минимальные значения достигаются в период доводки [4].

При воздействии электрических дуг на ванну за счет высокой концентрации энергии происходит местный перегрев металла до температуры 3000–3500°C. Основными процессами пылеобразования при этом являются интенсивное испарение железа и других элементов, а также электрическая эрозия поверхности шихты (металла).

Кроме того, за счет электро- и газодинамических сил в зонах дугового разряда происходит разбрызгивание металла, дробление образовавшихся капель и местный перегрев металла, интенсивное окисление и испарение компонентов шихты [5]. Интенсивность,

состав и свойства пылегазовых выбросов зависят от вместимости и других конструктивных параметров печей, особенностей энерготехнологических режимов их работы, выбора пылеулавливающих аппаратов.

Пыль ЭДП содержит железо, цинк, кадмий, свинец, хлор, щелочные и щелочноземельные металлы. Наличие в расплаве некоторых цветных металлов объясняется тем, что большинство современных конструкционных и специализированных сталей являются легированными или подвергаются цинкованию для защиты металлоизделий от коррозии. Из всего объема загружаемого материала в печь ДСП в пыль переходят практически на 100% цинк, около 10% всего марганца, 40% свинца. Химический состав пыли зависит от перерабатываемого стального лома, типа производимой стали и технологических параметров плавки.

Увеличение использования оцинкованной стали при производстве автомобильных кузовов и обшивок привело к увеличению содержания цинка в пыли с течением времени. Выбросы в ЭДП пропорциональны производству стали, таким образом, увеличение производства стали увеличивает количество пыли ЭДП. Примерно 1–2 масс.% лома, загружаемого в плавильные печи, превращается в пыль, это означает, что ежегодно во всем мире образуется до 5–7 млн т пыли.

Точная характеристика материала определяет перспективные пути его переработки. Необходимо знать не только химический состав пыли, также требуется выяснить ее минералогический состав. Неоднородность вторичного сырья – основная трудность при поиске «универсальной» технологии переработки пыли ЭДП. Каждая технология, внедряемая на производстве, должна быть адаптирована к химическому и минералогическому составу конкретной сталеплавильной пыли [6–8].

Считается, что пыль электросталеплавильного производства на 90% состоит из оксидов, остальные 10% представлены ферритами, сульфатами, сульфидами, хлоридами [6]. Цинк в пыли ЭДП представлен преимущественно в форме оксида (~50%) и франклинита или феррита (~45%) с изо-

морфно замещающими металлами $(Zn_x, Me_y)Fe_2O_4$, где Me – это Mn, Co, Ni, Cr, Ca, остальное – хлорид и сульфат [9]. Мас-совая доля железосодержащих компонентов может достигать 45%, что даже выше, чем у некоторых железных руд. Обнаружено сходство составов пыли ЭДП и никелевой латеритной руды.

Металлы переходят в пыль из разных источников. Например, цинк, образующийся из оцинкованного железного лома, попадает в пыль ЭДП из-за его низкой растворимости в расплавленной стали и шлаке, а также вследствие того факта, что давление паров цинка выше, чем давление паров железа при температурах производства стали [10, 11]. Свинец образуется из краски, присутствующей в кусках лома [11], а марганец, хром и никель [12] находятся в самих стальных сплавах. Хром получается из деталей из легированной стали [13].

Материал представляет собой мелкодисперсный порошок, имеет большой разброс в размерах частиц, поскольку содержит как возгоны цветных металлов и их оксидов, так и крупные частицы, вынесенные потоком газа из печи. Химический состав пыли также колеблется в широких пределах [14]. Пыль электродуговых сталеплавильных печей может иметь окраску от черной до красно-бурой.

С.-З. Рижеску в работе [15] указывает, что мелкие частицы в основном состоят из фаз $ZnFe_2O_4$ и Fe_3O_4 , которые занимают примерно 80–90% от общего количества пыли. Частицы среднего размера приведены оксидами или силикатами металлов. Большие частицы представляют собой силикаты или оксиды железа с частицами оксидов на них.

Важной характеристикой пыли являются горючесть и взрываемость. Способностью к воспламенению обладают пыли металлов, например, Mg, Al и Zn [16]. Пыль электросталеплавильного производства состоит из оксидов металлов, поэтому она не является горючим и воспламеняющимся материалом.

Несмотря на то, что пыли являются богатым сырьем для получения цинка и железа, ежегодно отвалы такой пыли пополняются на десятки тысяч тонн. Именно по этой причине актуальной является разработка рентабельной, эффективной и безопасной технологии, позволяющей переработать промпродукт с последующим возвратом соединений железа в переделы черной металлургии и извлечением цинка, а также других сопутствующих цветных металлов. Предложено достаточно много разнообразных технологий, часть из которых применяется на практике, в основном на зарубежных предприятиях.

ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ

Переработка пылей ЭДП большей частью представлена пирометаллургическими процессами, которые составляют около 90% всех мощностей переработки данного промпродукта.

Утилизация пыли электросталеплавильного производства в процессе плавки осложнена присутствием цинка в составе пыли, сильно летучего ($p = 0,116$ Па), но трудно восстанавливаемого металла. Цинк восстанавливается в виде паров, которые, поднимаясь с газовым потоком вверх, окисляются и конденсируются на шихте, загружаемой сверху. Таким образом, при прохождении шихты вниз происходит накопление и круговорот металла, увеличивающий расход кокса. Вредное воздействие цинка и его оксидов ускоряет разрушение футеровки из-за образования настывов [17]. Цинк не оказывает негативного влияния на свойства стали в процессе выплавки стали, но при затвердевании его присутствие нежелательно, так как он способствует образованию пузырьков газа и сегрегации на фронте затвердевания [18].

Существуют промышленные, лабораторные и запатентованные технологии металлургической переработки пыли электросталеплавильного производства^{6,7}.

⁶Ванюков А. В., Зайцев В. Я. Теория пирометаллургических процессов: учеб. для вузов: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1993. 384 с.

⁷Романтеев Ю. П., Федоров А. Н., Быстров В. П. Металлургия цинка и кадмия: учеб. пособ. / под общ. ред. В. П. Быстрова. М.: МИСиС, 2006. 193 с.

ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕСС

Наиболее распространенным процессом в промышленности для переработки цинксо-держающих материалов является Вельц-процесс (Waelz process) – процесс переработки во вращающейся трубчатой печи. Около 80% всей перерабатываемой пыли приходится на данный процесс [19].

Согласно авторам [20], Вельц-процесс и связанные с ним технологии прокалки и отмывки вельц-оксидов от фтора и хлора позволяют с большой эффективностью перерабатывать пыли ЭДП с получением высококачественного оксида цинка, именно поэтому сегодня за рубежом методом вельцевания перерабатывают более 80% пылей черной металлургии.

Вельцевание для переработки пылей черной металлургии начали применять еще с середины 70-х годов прошлого столетия в некоторых странах Европы, Японии и США. Способ предназначен для переработки окисленного сырья (также вторичного – кеки нейтрального выщелачивания цинка), все эти материалы схожи по составу и с пылью ЭДП [21].

Один из первых промышленных опытов по переработке шламов и пылей газоочистных установок черной металлургии во вращающихся трубчатых печах был освоен в немецкой компании «AG Krupp» [22].

В таблице представлено содержание основных компонентов в исходном сырье и в полученном после вельцевания продукте [20].

Авторами [23] было изучено распределение цинка, свинца и железа из пыли ЭДП в ходе карботермического восстановления. Процесс изучали в условиях избытка углерода при температурах 1000–1100°C на лабо-

раторной печи Таммана. Пробы отбирали каждые 5–10 мин. После этого анализировали пробы на цинк, свинец. Было показано, что уже за 15 мин обработки цинк удалился на 99%. При температуре 1100°C более чем 75% всего свинца испарилось уже в период нагрева, а за 15 мин выдержки при данной температуре свинец, как и цинк, был удален полностью.

После отгонки ценных компонентов в процессе вельцевания вельц-оксид подвергают прокалке или отмывке с целью удаления фтора и хлора. Получают конечный вельц-оксид с содержанием цинка 55–64%, хлора менее 0,06% и фтора менее 0,01%. После получения целевого вельц-оксида предусматривается получение из клинкера металлизированных окатышей, которые в дальнейшем могут быть возвращены в доменное или электроплавильное производство.

Благодаря тому, что процесс вельцевания обеспечивает высокую производительность с получением сравнительно чистого вельц-оксида, он широко распространен в США, а также в Испании, Франции, Германии, Мексике. В последние годы ведется активная реконструкция действующих вельц-цехов, а также строительство новых на территории России, Казахстана, в развивающихся странах Юго-Восточной Азии и Южной Америки, что приведет к увеличению доли перерабатываемой пыли ЭДП [24].

Согласно работе [25], применение процесса дистилляции пыли ЭДП, пыли медеплавильных производств, изгари в восстановительных условиях во вращающихся трубчатых печах позволило на ПАО «Челябинский цинковый завод» ежегодно производить

Состав пылей электродуговой плавки и продуктов ее переработки вельцеванием (на зарубежных производствах), %
 Composition of electric arc melting dust and the products of its Waelz processing (foreign manufactures), %

Элемент	Пыль электродуговой плавки	Клинкер	Вельц-оксид	Вельц-оксид	
				после отмывки	после прокалки
Zn	12–30	0,2–1,2	55–65	60–68	65–68
Pb	1–3	0,1–0,9	7–12	9–13	нет данных
Cl	4–12	0,1–0,5	4–8	0,05–0,5	<0,06
F	0,5–1,0	0,1–0,2	0,4–0,7	0,06–0,3	<0,02
Fe	24–46	30–50	<1,0	<1	<1
C	–	12–15	0,5–1,0	0,5–1,0	–

более 10 тыс. т цинка в металле и около 4 тыс. т свинца и олова в концентратах.

Таким образом, вельцевание является одним из самых эффективных способов переработки пыли на сегодняшний день, обеспечивает высокие показатели извлечения.

Многие из исследователей работают над способами интенсификации процесса вельцевания. Так, в работе [26] исследовали влияние размера частиц шихты, приготовленной на основе пыли ЭДП и цинковой руды. Установлено, что уменьшение размера частиц шихты до $+0,071-0,04$ мкм снижает степень возгонки цинка, о чем свидетельствует высокое остаточное содержание цинка в огарке, равное 1,02 масс.%. Увеличение крупности частиц шихты до размера $+0,315$ мкм приводит к резкому снижению остаточного содержания цинка в огарке до 0,02 масс.%. Однако при дальнейшем увеличении до размеров частиц около $+1,0$ мкм остаточное содержание цинка в огарке возросло до 0,48 масс.%. Данные исследования показывают, что размер частиц влияет на степень и скорость возгонки цинка при вельцевании. Для применения этих выводов непосредственно в производственной практике необходим контроль за процессами грануляции и брикетирования пыли.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОКУСКОВАНИЯ ДЛЯ ВЕЛЬЦ-ПРОЦЕССА

Эффективность окатывания и брикетирования в восстановительном обжиге изучали во многих работах [27–30].

Например, в патенте [31] предложен способ повышения эффективности восстановления цинка из пылевидных отходов. На первом этапе пыль ЭДП окусковывают совместно с измельченным углеродистым восстановителем, связующим материалом и с известьсодержащим материалом для формирования окатышей или брикетов, причем восстановитель подается в количестве выше стехиометрического в 1,5–2 раза. Затем проводят сушку материала и обжиг во вращающейся печи вместе с кусковым восстановителем крупностью 0–20 мм в количестве 200–500 кг на 1 т пыли ЭДП при температуре выгружаемых материалов 700–1000°C. От-

ходящие газы охлаждают и улавливают пыль, содержащую цинковые и свинцовые возгоны. Согласно представленным результатам, данное изобретение позволит повысить показатели извлечения цинка, а также получить остаточный продукт с показателем металлизации железа около 75%, что удовлетворяет требованиям сталеплавильной печи.

В патенте [32] смесь для вельцевания готовили из пыли ЭДП, гидроксида кальция в количестве 20–30% от содержания кремнезема в шихте, коксовой мелочи с размером частиц менее 1 мм (13–17% от массы всей шихты), затем проводили окомкование шихты с получением гранул размером 2–4 мм и влажностью 10–12%. В результате удалось повысить производительность процесса вельцевания до $1,1 \text{ т/м}^3 \cdot \text{сут}$ и снизить расход коксовой мелочи до 210 кг на 1 т пыли ЭДП.

Во многих работах представлены результаты исследования по выбору эффективного восстановителя и связующего вещества для формирования брикетов или окатышей. Так, в работе [26] исследовали три вида связующих веществ – бентонит (глина, состоящая из слоистых алюмосиликатов с высокой способностью к поглощению воды), гашеная известь и патока (отход сахарно-свекольного производства). Установили, что оптимальным связующим является патока в количестве 4,5–5% от массы руды.

В работе [33] также широко изучали различные виды связующих при агломерации. При использовании патоки достигается самая высокая степень возгонки цинка. Был предложен эффективный тип восстановителя – спецкокс, получаемый путем термоокислительного коксования угля (в данной работе – Шубаркольского месторождения).

Согласно представленным в работе [34] данным, спецкокс имеет реакционную способность – $5,2 \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}$, тогда как металлургический кокс только $0,62 \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}$. Для повышения экономичности производств в работе предложено применять для производства коксового восстановителя более дешевые и доступные виды углей – бурые, длиннопламенные, газовые, петрографически однородные и другие взамен каменных углей, это по-

может снизить себестоимость производимого кокса.

В технологической схеме, разработанной в АО «Уральский институт металлов» [35], пыль подвергают обезвоживанию до показателей влажности на уровне 6–8% сперва в радиальных отстойниках, затем на пресс-фильтрах, и в конце проводят сушку в сушильных барабанах. Высушенную пыль смешивают с коксовой мелочью и брикетируют, а полученные брикеты подвергают обжигу во вращающейся печи. В процессе получают возгоны с содержанием цинка 20–50% и металлized сырье с содержанием железа 55–60%.

Схожий процесс был предложен в Украинском научно-техническом центре металлургической промышленности «Энергосталь» [36], только процесс брикетирования был заменен на окатывание в тарельчатом грануляторе и вместо твердого углеродистого восстановителя (кокса и угля) применяли отходы производства нефтепродуктов.

В работе [37] также изучали способы снижения стоимости восстановительных процессов путем замены дорогостоящего кокса на более дешевые и не менее эффективные углеродистые восстановители. Один из предложенных – карбонизат рексил (получаемый методом высокоскоростной термоокислительной карбонизации угля).

Существуют разработки, направленные на снижение стоимости процесса вельцевания, а также повышение его эффективности и производительности. Хотя доля вельцевания в общем объеме перерабатываемой пыли ЭДП на сегодняшний день по-прежнему высока, эти внедрения могут увеличить рентабельность переработки залежей цинксо-держащей пыли.

По мнению многих исследователей, процесс вельцевания, имеющий уже более чем вековую историю, постоянно укрепляет свои позиции, в том числе и в переработке вторичного сырья, а также совершенствуется и представляет собой перспективный способ

переработки пыли ЭДП⁸ [38, 39].

РЕЦИКЛИНГ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Несмотря на вышесказанное, во многих публикациях отмечается перспективность возврата пыли ЭДП в оборот сталелитейных переделов.

Согласно исследованиям, проведенным специалистами фирмы «ESM» (США) рециклинг пыли ЭДП в собственное производство имеет ряд достоинств [40]:

- извлечение железа из пыли напрямую без проведения предварительного обесцинкования;
- увеличение выхода стали на плавке;
- обогащение вторичной пыли цветными металлами (цинк, свинец, кадмий);
- снижаются общие затраты на переработку пыли.

Авторами [41] изучалась возможность рециклинга пыли в дуговых сталеплавильных печах, который можно осуществлять двумя способами: с предварительным брикетированием и вдуванием. Согласно представленным в статье данным, при условии, если на Белорусском металлургическом заводе в плавку добавлять по 1–2 т пыли, то возможно утилизировать всю образующуюся пыль, при этом цинк будет снова возгоняться и улавливаться в газоочистных системах. Многократный рециклинг пыли в процессе способствует повышению содержания цинка и свинца в пыли с 20% до 30–35%, а в бедных по цинку пылях – с 5–6% до 30%. На рис. 1 представлено изменение содержания цинка и свинца в пыли после рециклинга для пылей с различным содержанием цинка [42].

Подобные исследования рециклинга пыли в ЭДП путем инъекции проводили на печах компании «Krupp Edelstahlprofile» (КЕР, Германия), а также в процессах «Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken» (Германия), «Det Danske Stalvalsev» (DDS, Дания) и «Carbofer» в Англии [43]. Пыль и уголь направляли в смеситель, а затем пневматической

⁸Худяков И. Ф., Дорошкевич А. П., Карелов С. В. Металлургия вторичных тяжелых металлов: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1987. 523 с.

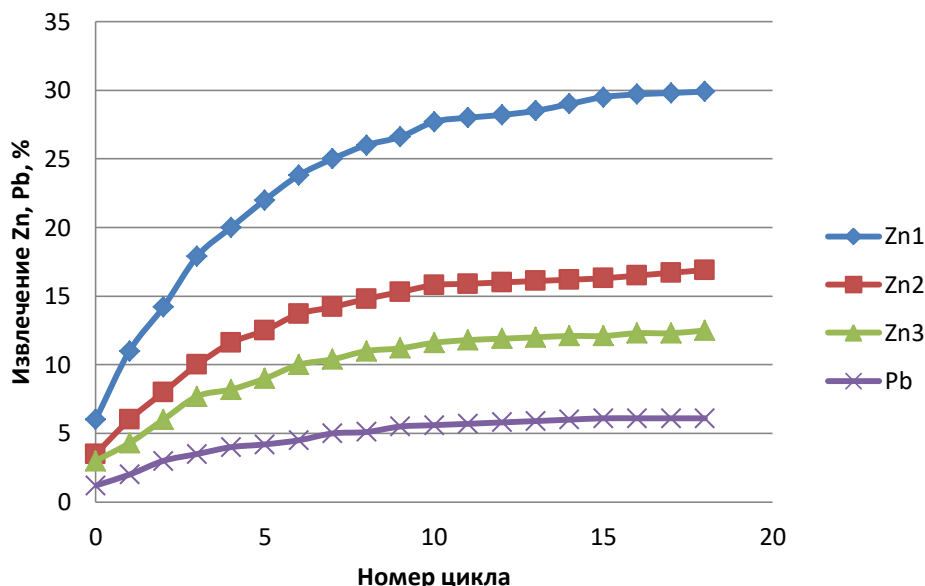


Рис. 1. Содержание цинка и свинца в пыли после рециклинга в дуговой сталеплавильной печи
Fig. 1. Zinc and lead content in dust after recycling in an electric arc furnace

установкой струей газа-носителя (сухой воздух под давлением 0,6 МПа) подавали на границу металл-шлак в количестве 80–150 кг/мин. Содержание цинка и свинца при этом возрастало в 1,5–2 раза за один цикл. Однако пневмосистемы являются ненадежными с точки зрения транспортировки и подачи шихты [44].

В печи ДСП-2 Белорусского металлургического завода (г. Жлобин, Республика Беларусь) пневматическую подачу пыли совместно с углеродистым восстановителем провести не удалось, смесь слеживалась в трубопроводе и бункере, а из-за большого количества подаваемого воздуха в печи формируется окислительная атмосфера и железо из пыли плохо восстанавливается. Было предложено проводить брикетирование пыли совместно с восстановителем. Исследования также проводили в условиях Белорусского металлургического завода, используя различные виды связующих для формирования брикетов, но по расчетам авторов [45] такой способ является экономически невыгодным.

Способ подачи пылей в конвертор в окискованном или брикетированном виде исследовали также фирмой «Стекло» (Канада), на заводах фирмы в городах Хилтон и Лейк-Эри [46].

Исследования, проведенные Волгоградским техническим университетом, а также на предприятии «Красный Октябрь», показали эффективность применения окисдоугольных брикетов в рециклинге пылей и шламов сталеплавильного производства [47].

ПЛАВКА В ПЕЧИ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОДОМ

В патенте [48] заявлен способ переработки пыли ЭДП в печах с вращающимся подом. В технологии железистый продукт, пыль и прокатную окалину смешивают с углеродистым восстановителем и шлакообразующими материалами и загружают в печь. Возгоны цинка улавливают и конденсируют. Смесь готовят таким образом, чтобы обеспечить содержание железа на уровне 50%. Шлакообразующую смесь добавляют в соотношении CaO/SiO_2 на уровне 0,6–1,6. Углеродистый восстановитель загружают из расчета содержания углерода в чугуне 1–4,5%. Далее осуществляют термообработку двухстадийным нагревом до 1200–1300°C, затем температуру повышают на 80–200°C. В способе, помимо получения оксида цинка, образуется твердофазный продукт с содержанием железа более 94%, при этом снижается расход восстановителя и топлива.

В статье [49] указано, что процесс переработки пыли в печах с вращающейся подиной – один из передовых пирометаллургических способов (не считая вельцевания), который используется в практике предприятий. Такие печи были введены в производство с 1998 по 2012 г. в США (4 печи), Японии (2), Корею (1). Но на сегодняшний день в США уже остановлено 2 агрегата из-за низких показателей производительности и экономической эффективности, однако в Корею установка работает весьма эффективно, но требуемый показатель экономического эффекта достигается при ежегодной переработке не менее 200 тыс. т пыли ЭДП.

Процесс ITmk3 (Ironmaking Technology Mark Three), разработанный японской компанией «Kobe Steel», является одним из передовых в железнотермической промышленности [50–55]. Технология реализуется в печах с вращающейся подиной (rotary hearth furnace – RHF), в качестве восстановителя применяется уголь взамен более дорогого кокса. По данным, представленным в статье [56], данный агрегат может перерабатывать различные по составу железосодержащие материалы (гематитовые, магнетитовые, сидеритовые руды и отходы металлургического производства). Процесс ведут при температуре около 1350°C, готовый продукт в виде гранулированного чугуна, по качеству не уступающего доменному, можно получить уже по истечении 9–14 мин. Получаемый в процессе шлак может быть легко отделен от чугуна, в частности, методом магнитной сепарации. В то же время авторами [57] утверждается, что в данном высокопроизводительном процессе возможно попутно извлекать цинк при переработке цинкосодержащего сырья, в том числе и пыли ЭДП. Таким образом, технология позволит получать одновременно три продукта: гранулированный чугун, который может быть использован в сталелитейной промышленности, в том числе и вместо лома, шлак, который может быть использован в производстве цемента, бетона и в дорожном строительстве и пыль, уловленную в рукавных фильтрах, содержащую, прежде всего, оксид цинка.

Схожими с предыдущим процессом являются технологии переработки пылей Fastmet и Fastmelt. В процессе Fastmet переработку окомкованного или гранулированного сырья в присутствии пылевидного углеродистого восстановителя ведут также в кольцевых печах с вращающейся подиной. По сути, сырье загружают на большой поворотный стол одним или двумя слоями. Нагрев осуществляется в ходе вращения стола горелками, установленными над слоем гранул. В процессе получают губчатое железо. Fastmelt отличается лишь тем, что аппаратная цепочка дополнена электропечью для выплавки чугуна или стали [58].

В 2000 году был запущен первый комплекс Fastmet на предприятии Hirohata Works of Nippon Steel Co производительностью 190 000 т в год пыли ЭДП [59]. Процесс позволяет получать богатый цинковый продукт с содержанием цинка 55–70%.

Процесс ZincOx, разработанный английской компанией ZincOx Resources Plc, признан лучшей технологией по переработке пыли ДСП в Республике Корея, поэтому в 2012 г. было запущено пилотное предприятие KRP на базе технологии. Его производительность составляет 200 тыс. т в год перерабатываемой пыли. Процесс на 1/3 экономичнее классического вельцевания благодаря следующим его преимуществам:

- большая производительность по извлекаемому цинку;
- замена дорогостоящего кокса углем;
- более высокое качество получаемого оксида цинка;
- формирование практически безотходного производственного цикла;
- утилизация и рециклинг тепловой энергии в процессе.

Основным агрегатом является кольцевая печь с вращающимся подом.

Реакционное пространство представляет собой кольцо диаметром 27 м и высотой 2 м. Нижняя (подовая) часть кольца вращается, совершая полный оборот за 15 мин. Температура процесса 1300°C достигается сжиганием газа в горелках. Схема реакционной части печи представлена на рис. 2 [60].

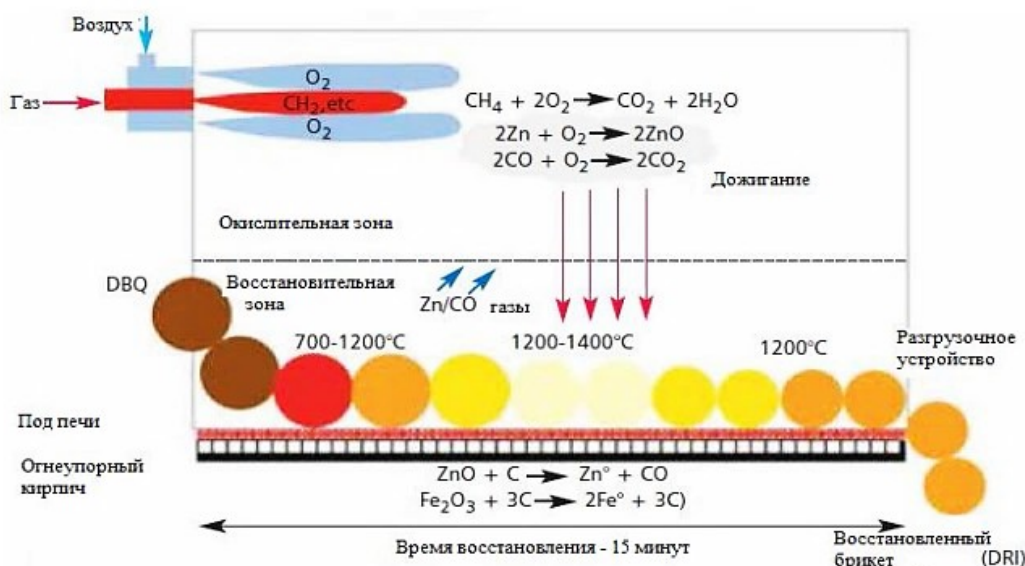


Рис. 2. Схема реакционной зоны процесса ZincOx [49]
Fig. 2. Diagram of the reaction zone of the ZincOx process [49]

Материал в печь загружают одним слоем в виде брикетов с помощью вибрационного питателя. Летучие компоненты возгоняются из брикетов, менее летучие образуют силикатный шлак, схожий с доменным. Железо остается в твердом состоянии, при этом около 85% всего железа восстанавливается в печи до металлического состояния и около 15% остается в форме оксида и переходит в шлак. Получаемые цинковые возгоны содержат около 60–65% цинка в форме оксида [61]. На корейском предприятии внедрены передовые установки газоочистки и системы отвода тепла и возврата его в процесс.

Еще одним процессом, использующим печь с вращающейся подиной, является разработанный в США процесс «DryIron», дословно «чистое железо». Эту разработку предложила фирма «Aum Research and Engineering» на основе разработок фирмы «Midland Ross». Шихту, приготовленную из пыли и кокса, агломерируют, далее нагревают до температуры около 1350°C. Извлечение цинка в данном процессе, как и в двух предыдущих, очень высоко – 95–97%. В ходе процесса «DryIron» большая часть железа, содержащегося в шихте, в ходе плавки переходит из окисленного состояния в металлическое [62]. Отличает этот процесс от большинства других подобных лишь способ окускования мелкодисперсного сырья в пыле-

угольные брикеты.

В печах с вращающимся подом перерабатывают также пыли в процессах «Inmetco» и «Comet».

Технология «Inmetco» была разработана Канадской компанией «International Nickel Company» (INCO) для переработки вторичного сырья, содержащего железо, никель, хром, цинк. Производительность процесса сравнительно небольшая и составляет около 45 тыс. т отходов в год. В качестве материалов применяют в основном отходы производства нержавеющей стали, но возможна переработка и пыли ЭДП. В результате Inmetco-технологии получают легированный чугун, возгоны цинка и свинца. На основе разработки есть ряд действующих предприятий в Пенсильвании (США), Тайланде и Канаде [63, 64].

Процесс «Comet» был разработан в исследовательском центре в Бельгии совместно с компанией «Paul Wurt» (Люксембург). В отличие от других процессов в печи с вращающимся подом, в этом случае сырье и угольный восстановитель загружают на под печи тонкими чередующимися слоями высотой 3–6 мм. Перерабатываемый материал также имеет мелкий размер (до 2 мм). Температура в печи 1300°C. В процессе обеспечивается высокая степень металлизации железа (около 90–95%) за счет меньшего размера ча-

стиц, однако из-за этого процесс проигрывает другим схожим в производительности. Степень возгонки цинка и свинца – 90–95%. Спекшийся материал дробят на выходе из печи и направляют в сталеплавильные печи [65, 66].

АГЛОМЕРАЦИЯ И ОКУСКОВАНИЕ

На многих предприятиях пыли ЭДП возвращают в аглофабрики и спекают совместно с вновь поступающим сырьем, шламами, коксовой мелочью и другими отходами [67]. Такие способы действуют на предприятиях компаний «Bethlehem Steel» (США) и «Inland Steel» (Австралия).

В докладе [68] был представлен способ обесцинкования пыли ЭДП путем их переработки агломерацией под давлением. По данным автора процесс имеет высокую производительность, низкие энергозатраты и высокое качество продукции – агломерата (для возврата в процессы производства стали) и цинковой пыли.

В работе [69] исследовали возможность переработки пылей в руднотермических печах. Технология разработана в ООО «Энерготерм-система» и позволяет получать чугуны и черновой цинк. В печь загружают брикеты из пыли ЭДП и углеродистого восстановителя, цинк и свинец улавливают в конденсаторах, а отходящие нагретые газы используют для подготовительной термической обработки брикетов.

Был предложен также высокоинтенсивный процесс переработки пылей и других цинксодержащих отходов плавкой в самовспенивающейся ванне [70]. По мнению автора, этот процесс обеспечивает большую производительность в отличие от традиционной восстановительной плавки.

Предложен способ VHR – обработка пыли в вакууме [71]. Процесс ведут в несколько этапов:

- 1) сухую пыль выдерживают в вакууме при давлении 133 Па и температуре 500–900°C;

- 2) восстанавливают цинк железом после восстановления FeO;

- 3) цинк испаряется, его улавливают в конденсаторах при температуре выше точки

кипения, но при том же низком давлении;

- 4) железистый продукт брикетируют и направляют в сталелитейные переделы.

Степень извлечения цинка в данном процессе близка к 100%.

ПЛАЗМЕННАЯ, ДУГОВАЯ И ВАКУУМНАЯ ПЛАВКА

Известна пирометаллургическая технология переработки пылей плавкой в факельном реакторе. Реактор представляет собой небольшой цилиндрический агрегат с диаметром внутренней части около метра, а высотой до 3 м. В качестве топлива в реакторе применяют природный газ, который подают в кислородно-воздушную смесь и сжигают, достигая тем самым температуры факела около 2000°C. Подаваемые в факел материалы расплавляются, образуя шлак, который сосредоточивается на дне реактора. Цинк возгоняется, переходит в газовую фазу, его улавливают в коллекторе в виде оксида, после чего направляют на дальнейшие стадии очистки и получение чистого оксида цинка. Оставшийся шлак, содержащий большое количество железа, сливают и направляют на сталеплавильный передел [72].

Достаточно известной на сегодняшний день является технология переработки пылей путем циклонной плавки (процесс «Contor»). Процесс проводят в плавильных циклонах, подачу сырья осуществляют тангенциально совместно с кислородным дутьем и топливом. Развиваемые в циклоне температуры – 1800–2000°C. Полученный расплав, как и в ранее описанном способе, опускается на дно агрегата, а цинк конденсируют и направляют на очистку. Основными преимуществами процесса «Contor» является то, что состав подаваемой шихты можно варьировать, цинк и другие возгоняемые металлы имеют высокое извлечение, а тепло, выделяемое в процессе, достаточно полно утилизируется [73, 74].

Фирмой Paul Wurth был предложен процесс «Primus». Данная технология осуществляется в две стадии с применением двух плавильных агрегатов – многоподовой (8 подов) вертикальной и электродуговой печей. Процесс достаточно неприхотлив с точки

зрения применяемого сырья. Температуры сравнительно невысокие – около 1100°C. Возгоняемый оксид цинка улавливают в рукавных фильтрах после необходимого охлаждения. Продуктами процесса «Primus» являются оксид цинка, чугун и инертный шлак, который нашел свое применение в дорожном строительстве. В 2009 г. компания «Dragon Steel Corporation» успешно запустила такую технологию с производительностью 120 тыс. т пыли на Тайване с соблюдением требуемых экологических нормативов [74, 75].

Получать одновременно три товарных продукта плавки позволяет процесс PIZO, запущенный в США в 2006 г. Данную технологию осуществляют в индукционных печах, процесс проводят в одну стадию. При этом переход железа в чугун составляет 95%, а содержание цинка в получаемом оксиде достигает 70% [76].

На предприятии «ThyssenKruppStahl» в Дуйсбурге реализован процесс «OXYCup». Переработка осуществляется в печах шахтного типа, шихтовые материалы, состоящие из пыли и восстановителя, загружают в окискованном виде, так называемых самовосстанавливающихся брикетах. Шихту загружают сверху, дутье подают противотоком снизу, таким образом материалы нагреваются до температур около 1000°C, железо и цинк начинают восстанавливаться. По окончании процесса получают чугун с содержанием углерода около 4% и шлак, оксид цинка улавливают и далее перерабатывают [77].

Достаточно высокими показателями производительности обладает процесс «ZEWA», разработанный на чешском предприятии «VltkoviceSteelworks». По данной технологии можно перерабатывать пылевидные отходы с высоким содержанием цинка и железа. Промпродукт, обогащенный углеродистым материалом, перерабатывают в электродуговых печах постоянного тока. Отличительной особенностью данного процесса от описанных ранее является то, что по окончании получают сталь, бедный шлак и вторичный промпродукт газоочистки. В этом процессе не получают готового цинкового продукта, но

производят качественную сталь, а пылевой продукт становится в разы богаче по цинку (50–70%) и свинцу, что дает возможность перерабатывать его гидрометаллургическими способами по упрощенным схемам [78].

Перспективными направлениями в металлургической переработке пылей черной металлургии являются технологии, основанные на плазменном нагреве материала. Плазменные технологии достаточно гибкие к параметрам процесса и исходному сырью, есть возможность сократить затраты времени и средств на предварительное окискование пыли. Технологий подобного рода на данный момент достаточно много, среди самых известных – «Tetronics», «ScanDust», «ArcFume», «Минтек» и др. [79].

В компании «Mintek» (США) исследовали технологии плазменно-дуговой переработки пыли. Один из процессов реализуется на постоянном токе. Основными элементами являются графитовые катод и анод (расплав в ванне печи). Для генерирования плазмы применяют азот или аргон. Через отверстие в графитовом электроде подается плазмогенерирующий газ. Пыль, предварительно окискованную, подают вместе с антрацитом и кремниевым флюсом. Антрацит служит восстановителем для цинка и свинца, при этом железо остается в окисленном состоянии в шлаке. В данном процессе извлечение цинка и свинца практически полное. Переходя в газ, цинк окисляется до оксида и его содержание в возгонах превышает 70–72%.

Этой же компанией в 1994 г. проведены испытания о возможности применения технологии «Envirodust», базирующейся на процессе «Enviroplas». Применяли две плазменно-дуговые печи и конденсатор для улавливания возгоняющегося цинка типа «Imperial Smelting» (улавливание каплями разбрызгиваемого жидкого свинца). В первой печи проводили расплавление материалов, а затем расплав направляли во вторую печь для имитации промышленного процесса подачи горячего шлака из доменной печи в печь для очистки. Схема процесса представлена на рис. 3 [80].

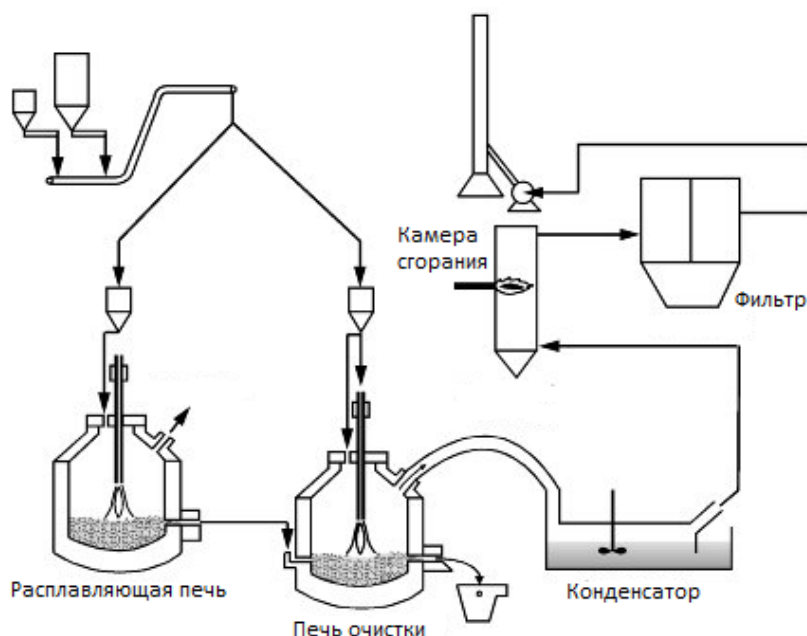


Рис. 3. Схема процесса Envirodust [69]
 Fig. 3. Diagram of the Envirodust process [69]

В процессе содержащиеся в пыли оксиды цинка и свинца сначала восстанавливают (коксом) до металлического состояния, а затем возгоняют, переводя в газовую фазу. Оставшийся железистый расплав и шлак сливают [81].

На одном из предприятий Норвегии разработан процесс «ArcFume». Шихта представляет собой смесь пыли с углеродным восстановителем (уголь, кокс). Цинк из пыли восстанавливается и возгоняется вместе с восстановительными газами, а затем улавливается в рукавных фильтрах, железо переходит в шлак в виде оксида. В процессе применен также плазменный нагрев.

Разработанный в Великобритании процесс «Tetronics» также является примером реализованного процесса плазменной переработки. Технология осуществляется в печах постоянного тока в атмосфере аргона. Шихта состоит из пыли, флюса и кокса. Восстановление ведут в диапазонах температур 1450–1550°C. В результате получают чугун, шлак и черновой оксид цинка. Преимущества данного процесса заключаются в том, что не требуется предварительное окускование сырья, процесс достаточно экологичен и универсален относительно подаваемого сырья, капитальные затраты значительно ниже, чем

для других подобных технологий [82].

На сегодняшний день разработано достаточно много различных технологий, которые позволяют эффективно перерабатывать пыль черной металлургии, содержащие цинк. Однако многие из них остались на стадии разработки, по некоторым проводили укрупненные промышленные испытания, но они не нашли широкого практического применения в силу различных причин. По словам авторов [38], шахтная печь компании «Mitsui» (Япония) требует огромных капитальных вложений, факельные виды плавки дороги и ненадежны, в эксплуатации многоподовых печей возникает множество проблем при обслуживании, плазменные виды плавки энергозатратны и имеют невысокую производительность. Процесс «Ausmelt» показал эффективность только при переработке остатков выщелачивания. К процессам, не нашедшим своего широкого промышленного применения, относятся «IBDZ-ZIPP» (Канада), «MRP» (Великобритания), реакторы кипящего слоя, печи барабанного типа и др. Исследованы способы с окускованием и без, при атмосферном и повышенном давлении, в атмосфере воздуха и вакууме, с применением твердых, газообразных и жидких восстановителей, электрического, топливного и плаз-

менного нагрева, процессы, осуществляемые в одну стадию, и многостадийные. Но, несмотря на большое разнообразие технологий, все они в основном решают частные задачи и имеют серьезные недостатки, ограничивающие их широкое распространение.

ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛИ

Гидрометаллургические процессы в сравнении с пирометаллургическими обеспечивают большую селективность по ценным компонентам, возможность регулирования технологических параметров для интенсификации. Такие процессы более гибки и позволяют перерабатывать пыли с постоянно изменяющимся составом. Меняя тип растворителя, можно практически селективно извлекать необходимый металл из пыли. Также гидрометаллургические процессы позволяют эффективно и рентабельно работать с материалами даже с низким содержанием ценного компонента. Многие гидрометаллургические процессы безопасней для экологии окружающей среды и человека. Как отмечалось ранее, пирометаллургические технологии в большинстве позволяют получать оксид цинка, тогда как на последней стадии гидрометаллургических технологий (электролиз) получают высокочистый металл (катодный цинк). В настоящий момент предложено достаточно много различных гидрометаллургических способов (в том числе и в комплексе с пиропроцессами) переработки пылей черной металлургии, хотя многие из них еще не нашли широкого промышленного применения (особенно в России). Большинство ученых и инженеров отмечают, что будущее вторичной металлургии именно за этими технологиями. Ниже рассмотрены разработанные на сегодняшний день гидрометаллургические технологии переработки цинксодержащей пыли, образующейся в ходе электродуговой плавки стали.

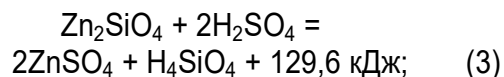
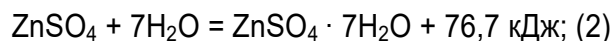
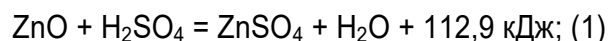
Гидрометаллургические способы основаны на растворении исходного вещества и переводе ценного компонента (цинка) в раствор в виде различных соединений. При этом остальная масса сырья, в данном случае соединения железа и пустая порода, остается в

виде твердого продукта – кека. Поскольку основным процессом гидрометаллургической технологии является растворение (выщелачивание), то и способы можно разделить на группы по типу применяемого растворителя – кислотное, щелочное, комплексообразующее.

КИСЛОТНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ

Выщелачивание серной кислотой.

Процесс выщелачивания с использованием серной кислоты считается важным этапом в гидрометаллургии цинка как из первичного, так и из вторичного сырья. Он включает растворение цинксодержащих минералов в разбавленной серной кислоте с образованием сульфатного цинкового раствора по реакциям:



где Me – Cd, Cu, Co, Ni, Fe, As и редкие металлы. В гидрометаллургии передел «выщелачивание» включает совокупность операций: растворение компонентов материала в серной кислоте, отстаивание, сгущение и фильтрацию пульпы, гидролитическую очистку раствора сульфата цинка от примесей.

При этом сульфат цинка (ZnSO_4) легко растворяется в воде, и на него кислота не расходуется, феррит цинка ($\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) растворяется в слабой серной кислоте значительно труднее, чем оксид цинка. Кремнекислый цинк ($2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$) сравнительно легко растворяется в слабой серной кислоте, однако его присутствие в исходном материале нежелательно, так как ортосиликат цинка служит основным источником загрязнения раствора кремнекислотой, ухудшающей отстаивание и особенно фильтрацию растворов. А сульфид цинка в разбавленных растворах кислоты практически не растворяется⁹.

Кислота – дешевый реагент, получаемый на большинстве предприятий по производству меди и цинка при утилизации отходящих сернистых газов. Гидрометаллургические процессы с применением серной кислоты хорошо отработаны и изучены, протекают интенсивно и эффективно. Однако сернокислый способ выщелачивания имеет весомый недостаток. Пыль черной металлургии представлена главным образом соединениями железа и цинка, причем доля железа в пыли чаще всего значительно превышает количество цинка. Таким образом, в равной степени интенсивно протекает растворение и железа и цинка (чаще железо растворяется активнее). Так, по предварительным данным кислота будет реагировать примерно на 60% с соединениями железа и только на 40% – цинка. В том случае, если в пыли присутствуют другие кислоторастворимые соединения активных металлов (кальция, магния), на цинк будет расходоваться только 10% серной кислоты. По этой причине растворы получаются богатыми по железу и бедными по целевому цинку. Очистка таких растворов от железа является дорогостоящей и проблематичной по известным причинам. Растворенное железо мешает удалению ионов меди, кадмия и кобальта в процессе очистки таких растворов. Кроме того, ионы железа способствуют коррозии анодов и увеличивают удельный расход электроэнергии при электролизе цинка [83].

Выщелачиванию цинка серной кислотой из пыли ЭДП посвящен целый ряд исследований [84–88]. В них изучалось влияние концентрации, температуры, продолжительности выщелачивания и скорости перемешивания.

Автор [89] показал, что количество растворенного цинка увеличивается в соответствии с продолжительностью выщелачивания при определенных значениях pH и температуре окружающей среды. Температуру выщелачивания контролировали на уровне 60°C, а скорость вращения дискового образца составляла 600 об/мин. По мере уменьшения значения pH количество растворенно-

го цинка увеличивалось. В этих условиях наиболее высокая концентрация выщелоченного оксида цинка была получена при низком pH равном 1.

Изучая сернокислотное выщелачивание, М. Круэллс с соавторами [89] подчеркнули, что частицы цинка практически не зависят от активности серной кислоты в исследованном диапазоне условий, тогда как для частиц железа скорость реакции зависит от активности кислоты. Таким образом, извлечение цинка, содержащегося в наиболее реакционноспособных частицах, представляет собой реакцию нулевого порядка по активности серной кислоты.

Коллектив авторов в работе [85] показал, что извлечение цинка увеличивается с увеличением продолжительности выщелачивания. Они проводили эксперименты при следующих условиях: температура варьировалась от 20 до 80°C, концентрация H_2SO_4 составляла 0,4 М, соотношение Ж:Т (кислота:пыль) = 1,2 и продолжительность выщелачивания 20 мин. Было обнаружено, что при температуре 40°C было извлечено 50% цинка, в то время как при температуре 80°C и продолжительности выщелачивания 60 мин было извлечено 55% цинка. Авторы исследовали влияние соотношения твердое вещество/жидкость при температуре 20°C, концентрации H_2SO_4 0,4 М, продолжительности выщелачивания 60 мин и обнаружили, что экстракция цинка увеличивается с увеличением соотношения. Результаты показывают, что при соотношении Ж:Т = 0,4 процент извлеченного цинка составлял 40%, при соотношении Ж:Т = 0,6 извлечение увеличилось до 45%, и при соотношении к Ж:Т = 1,2 составляло 51%.

Согласно данным [88], выход цинка из пыли ЭДП увеличивается с повышением температуры при высокой концентрации серной кислоты и достигает примерно 75% при 84°C после 60 мин выщелачивания. Доказано также, что концентрация кислоты влияет на скорость извлечения цинка.

Выщелачивание растворами серной кис-

⁹Кляйн С. Э., Козлов П. А., Набойченко С. С. Извлечение цинка из рудного сырья: учеб. пособ. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. 492 с.

лоты с низкой концентрацией от 0,1 до 2,0 М в интервале температур от 18 до 60°C может быть частичным решением проблемы феррита цинка в пыли. Для богатого цинксодержащего сырья реакционная скорость по цинку практически не зависит от концентрации серной кислоты в исследованном диапазоне в отличие от реакционной скорости по железу. Таким образом, можно извлечь в раствор 90% цинка и менее 50% железа. Основной сложностью применения этого метода является сильное обводнение технологической цепочки: при переработке 1 т пыли может получаться около 20–25 т растворов. Испытания осуществлялись в полупромышленном масштабе, и промышленного применения метод пока не нашел.

Х. Уян и его соавторы [90] разработали новый трехступенчатый процесс извлечения цинка и железа из остатков от выщелачивания цинка: восстановительный обжиг, кислотное выщелачивание и магнитная сепарация. Феррит цинка в остатке может эффективно разлагаться до ZnO и Fe_3O_4 в атмосфере CO , CO_2 и Ar , при этом эффективность выщелачивания цинка составляет 61,4%, в то время как растворенное железо составляет всего 25,34%, после магнитной сепарации выход железа увеличивается до 80,90%.

Коллектив исследователей во главе с П. Оустадакисом [91] изучал характеристики и выщелачивание разбавленной серной кислотой. Ж. Лангова и ее соавторы [92] провели атмосферное выщелачивание отходов сталеплавильного производства и осаждение гематита из раствора сульфата железа.

Результаты выщелачивания серной кислотой при атмосферном и повышенном давлении пыли (с содержанием 26% цинка, 40% железа) сталелитейного завода США показали примерно одинаковую эффективность выщелачивания цинка. Извлечение цинка было от 32% (при использовании растворов с концентрацией серной кислоты 0,2 М) до 76% (концентрация серной кислоты 2 М) с помощью автоклава при параметрах выщелачи-

вания (2 ч, 270°C) и от 53% (0,2 М) до 79% (2 М) при помощи атмосферного выщелачивания (4 ч, 70°C). При использовании серной кислоты высокой концентрации (4 М) была достигнута степень извлечения цинка на уровне 97%, но при этом в раствор почти полностью перешло железо.

П. Цакиридис и его соавторы [93] изучали гидрометаллургический процесс восстановления цинка из пыли ЭДП, сосредоточиваясь на выщелачивании разбавленной серной кислотой с перемешиванием и разработке процесса очистки раствора после выщелачивания для извлечения высокочистого цинка электроэкстракцией.

Цинк не может быть извлечен без растворения железа при атмосферном давлении, и поэтому изучалось извлечение цинка из отходов сталеплавильного производства с помощью кислотного выщелачивания под давлением и осаждения гематита с использованием микроволнового излучения [94]. В качестве выщелачивающего агента применяли разбавленную серную кислоту, а температура была относительно высокой, что привело к осаждению большей части железа (III) в виде гематита.

П. Ксантопоулосу [95] удалось из насыщенного раствора, полученного при выщелачивании пыли ЭДП серной кислотой, выделить цинк химическим осаждением. Извлечение цинка достигло 99,5% в виде осадка гидроцинкита ($3ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$) и гидрата гидроксида карбоната цинка ($ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2 \cdot H_2O$). В качестве осаждающих агентов использовались Na_2CO_3 и $(NH_4)_2CO_3$.

В работе [96] отмечается, что максимальная степень извлечения цинка в раствор при сернокислотном выщелачивании составляет 87% при использовании 1-молярного раствора при 80°C и Ж:Т = 50:1 или в растворах с концентрацией 0,25 моль/дм³ и отношении Ж:Т = 20.

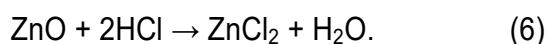
В работе¹⁰ был исследован способ интенсификации процесса сернокислотного выщелачивания методом нагрева раствора микро-

¹⁰Попов А. А. Гидрометаллургическая технология переработки цинксодержащей пыли сталеплавильного производства: дис.... канд. тех. наук: 05.16.02. СПб., 2016. 115 с.

волнами. Данный способ нагрева обеспечивает более низкие затраты электроэнергии, быстрый нагрев пульпы. Согласно представленным в статье данным, выщелачивание цинка завершалось за несколько минут. В случае выщелачивания с обычным нагревом растворов при температуре 50°C затрачиваемая энергия составляет 0,6 кВт·ч, тогда как при микроволновом нагреве около 0,1 кВт·ч. Извлечение цинка в таком способе увеличивается на 10–20%, с повышением мощности установки увеличивался и уровень извлечения. Эффективность процесса объясняется перегревом пульпы и взаимодействием микроволн с частицами пыли.

Выщелачивание соляной кислотой.

Известны способы выщелачивания пыли ЭДП в других кислотах, например в соляной кислоте для преобразования оксидов металлов в хлориды металлов [97] по реакции:



Т. Йошида [86] показал, что количество извлеченного цинка увеличивается со временем, а извлечение растет с уменьшением pH. Он также сосредоточил внимание на влиянии температуры на цинк, извлекаемый с помощью выщелачивания соляной кислотой, и обнаружил, что с увеличением температуры и продолжительности выщелачивания увеличивается и извлечение цинка.

Ж. Лангова и ее соавторы [98] изучали селективное выщелачивание цинка из феррита цинка соляной кислотой, а также влияние температуры на металлы, извлекаемые из феррита цинка, и показали, что с повышением температуры процент цинка, извлеченного из феррита цинка, также растет. Этот результат был подтвержден Дж. Джерзи и П. Островской [99], которые изучали выщелачивание пыли ЭДП различными кислотными растворами, такими как серная, соляная и азотная кислоты; они пришли к выводу, что выщелачивание соляной кислотой является лучшим вариантом для выщелачивания цветных металлов из пыли ЭДП.

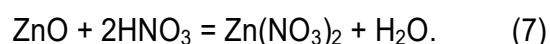
В работе [100] авторами отмечены эффективность и рентабельность проведения солянокислого выщелачивания цинксо-

жащей пыли конвертерного производства на АО «АрселорМиттал Темиртау» (Казахстан) – ведущей мировой компании по производству стали. Источником соляной кислоты для выщелачивания служат отработанные растворы травильного отделения (это отделение горячего цинкования предприятия). Пыли ДСП значительно богаче конвертерных пылей по содержанию цинка, но технология может быть применена и к этим пылям с предварительной оптимизацией технологических параметров.

Выщелачивание азотной кислотой.

Хотя при гидрометаллургической переработке пылей ЭДП с использованием HNO_3 было достигнуто достаточно высокое извлечение цинка, исследование этого метода ограничено из-за высокой стоимости растворителя и связанных с этим способом опасных выбросов закиси азота. Поэтому он считается дорогостоящим, неэкологичным и небезопасным процессом [101]. Тем не менее, был зарегистрирован ряд патентов, использующих HNO_3 в качестве выщелачивающего агента, например, зарегистрированный У. Ф. Дринкардом и Х. Дж. Вернером [101]. В таких случаях пыль ЭДП сначала промывают водой для удаления хлоридов, а затем выщелачивают в растворе азотной кислоты.

Уравнение реакции оксида цинка и разбавленной кислоты имеет вид:



Использование электролитического и/или сульфидного осаждения полученного раствора обеспечивает удаление железа, а также удаление тяжелых металлов, которые испаряются и разлагаются. Полученный продукт снова выщелачивают водой для удаления нитрата кальция. Затем остаток обрабатывают комплексообразователями на основе аминов металлов для извлечения цинка; марганец и магний впоследствии извлекают разделением в кислоте.

Выщелачивание органическими кислотами. Исследовали также выщелачивание пыли в некоторых органических кислотах, например, в уксусной кислоте. В первую очередь пыль ЭДП тщательно очищают от хло-

ридных соединений, поскольку даже незначительное их содержание приводит к высоким показателям извлечения железа в раствор. Содержащиеся в пыли цветные металлы при воздействии уксусной кислоты переходят в форме ацетатов в раствор. При этом железо остается в твердом остатке, там же остаются и другие малорастворимые примеси. Оставшиеся кеки с минимальным содержанием цинка (около 2%) рекомендовано возвращать в процессы черной металлургии. Раствор направляют на сульфидное осаждение цветных металлов, в том числе и цинка, путем обработки сероводородом. Получаемые сульфиды отделяют от раствора и направляют на производство цинка. Хотя данный способ и обеспечивает высокие показатели извлечения цинка (около 80%), но в то же время наряду с сульфидом цинка осаждаются и сульфиды других цветных металлов – кадмия, меди, свинца, что требует дополнительных затрат при дальнейшей переработке этого полупродукта. Технология была реализована в промышленном масштабе в США, однако низкая рентабельность производства привела к закрытию предприятий [102, 103].

В работе [104] изучалась возможность

выщелачивания цинка из пыли органическими кислотами. В качестве растворителя авторами были предложены акриловая кислота (пропановая, $C_3H_4O_2$), акриловая кислота совместно с метилбензолом, этановая (уксусная), пропандиовая (малоновая), этандиовая (щавелевая). Согласно результатам, при использовании акриловой кислоты совместно с метилбензолом удалось достигнуть извлечения цинка около 86 % при одновременном извлечении железа 0,1%. На рис. 4 представлена диаграмма показателей извлечения цинка и железа с использованием различных органических и неорганических кислот.

Из рис. 4 очевидно, что в большинстве кислот при достаточно высоком извлечении цинка в раствор 75–98% железо также хорошо извлекается на 20–50%. Кислоты, проявляющие селективность по отношению к цинку, демонстрируют низкий показатель извлечения цинка – на уровне 30–40%.

Щелочное выщелачивание. Выщелачивание с использованием щелочного раствора – более реализуемый процесс при гидрометаллургической переработке отходов, таких как пыли ЭДП, из-за высокого отношения железо /цинк и особенно вследствие высокого

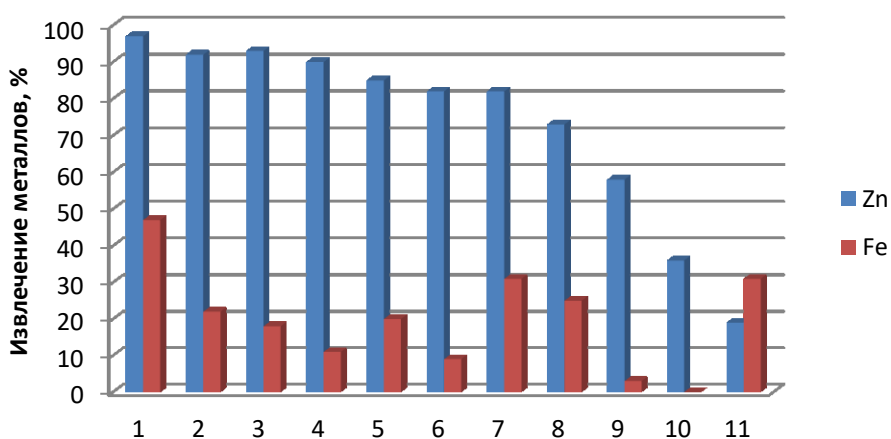


Рис. 4. Извлечение цинка и железа в различных кислотах с концентрацией 1 моль/дм³:

1 – серная кислота; 2 – фосфорная кислота; 3 – малоновая кислота;
4 – полиакриловая кислота; 5 – азотная кислота; 6 – акриловая кислота; 7 – лимонная кислота;
8 – соляная кислота; 9 – уксусная кислота; 10 – бензойная кислота; 11 – щавелевая кислота

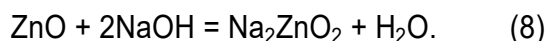
Fig. 4. Extraction of zinc and iron in various acids with 1 mol/dm³ concentration:

1 – sulfuric acid; 2 – phosphoric acid; 3 – malonic acid; 4 – polyacrylic acid; 5 – nitric acid;
6 – acrylic acid; 7 – citric acid; 8 – hydrochloric acid; 9 – acetic acid; 10 – benzoic acid;
11 – oxalic acid

содержания галогенов, негативно влияющего на электролиз сульфатного электролита. Сложность, связанная с кислотным выщелачиванием, приводит к большому интересу к процессу селективного выщелачивания, при котором не потребляется повышенное количество кислот для растворения других связанных металлов, таких как кальций, железо, магний, алюминий, медь и других [105, 106]. Железо является преобладающим металлом в пыли ЭДП, оно растворяется в кислой среде, но не в щелочной. Таким образом, щелочное выщелачивание становится более привлекательной альтернативой селективному выщелачиванию ценных металлов из пыли.

Для выщелачивания ценных металлов из пыли используется несколько щелочных агентов, основные из них – гидроксид натрия, карбонат аммония и аммиак. Выщелачивание цинка и свинца из пыли в щелочных растворах зависит от продолжительности выщелачивания, концентраций щелочных растворов, фазового соотношения и температуры выщелачивания. Затем свинец извлекают цементацией, а цинк – электролизом из щелочного выщелачивающего раствора.

Выщелачивание в растворе гидроксида натрия. Известны способы переработки пыли с использованием в качестве реагента каустической соды [107], поскольку железо в щелочах не растворяется, а некоторые другие компоненты пыли неактивно переходят в раствор. Таким образом, преобладающими компонентами, которые содержатся в растворах после выщелачивания, являются цинкат- и плюмбат-ионы, что значительно упрощает процесс последующей очистки. Выщелачивание цинка протекает по следующей химической реакции:



Извлечение цинка зависит от массового соотношения NaOH/пыль и структуры ферритов [105].

А. Дж. Б. Дутра, П. Р. П. Пайва, Л. М. Таварес [106] использовали различные методы щелочного выщелачивания для растворения цинка, присутствующего в пылях ЭДП. Они

изучили обычное выщелачивание с перемешиванием, выщелачивание под давлением, обычное выщелачивание после предварительной микроволновой обработки, выщелачивание при обработке ультразвуком с перемешиванием. Выяснилось, что ультразвуковое перемешивание не повлияло на извлечение цинка. В их исследовании после 4-часового выщелачивания при температуре 90°C и концентрации NaOH 6 М максимальное извлечение цинка из пыли ЭДП составило около 74%.

При наличии в пыли кремния он также переходит в раствор под воздействием щелочи, однако в данном случае предусмотрена очистка от него при добавлении гидроксида кальция с образованием труднорастворимого силиката [107].

В Германии был исследован малозатратный процесс щелочной обработки пылей ДСП. Из электрофильтров ее направляют в бассейн с водой, куда подают щелочь, доводя растворы до pH до 9,3–9,8. Цинк и свинец переходят в растворимые соединения, затем полученную пульпу разбавляют водой, проводят осветление и обезвоживание фильтрацией на пресс-фильтрах; полученный после гидролитического осаждения свинца и цинка концентрат направляют на цинковые заводы [108].

Автор [109] определил оптимальные условия для выщелачивания с использованием каустической соды: температура 95°C, соотношение Ж:Т = 7:1, 10 М NaOH, продолжительность выщелачивания – 2 ч. Он также указал, что извлечение цинка увеличивается с ростом соотношения Ж:Т. В указанных условиях было извлечено 85% цинка и 90% свинца. Оставшиеся металлические примеси (свинец, медь, кадмий и т. д.) удалялись щелочным электролизом цинка после цементации цинка при 50°C.

В работе [110] авторы исследовали способ селективного извлечения оксида железа и оксида цинка. Пыли в виде пульпы со щелочью подают в реактор вихревого слоя и обрабатывают магнитным полем. Затем разделяют образовавшиеся первичные раствор и осадок. Вторичную пульпу получают добавлением технической воды, щелочи, соды

и извести и снова подают в реактор с магнитным полем. Таким образом, в первом реакторе получают оксиды железа, а во втором – оксиды цинка.

Стоит заметить, что сульфид и феррит цинка в щелочи практически не растворяются, а, значит, при большой доле их в сырье общее извлечение цинка будет сравнительно низким.

Способ имеет также и ряд других недостатков. Одним из основных является высокая стоимость щелочи, а, следовательно, необходимость по возможности наиболее полной ее регенерации. Также стоит отметить, что процессы выщелачивания в щелочи требуют использования дорогостоящего и сложного автоклавного оборудования.

При наличии в пыли щелочных элементов предложено проводить предварительное водное выщелачивание для снижения потерь каустика.

Комбинированная обработка со щелочным выщелачиванием. Доказано, что комбинация пирометаллургических и гидрометаллургических методов помогает улучшить переработку комплексного сырья, содержащего несколько металлов.

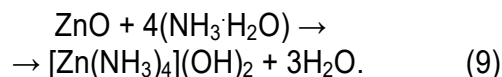
П. Халли и его соавторы [111] изучали гибридный обжиг с выщелачиванием пыли органической кислотой. Пыль ЭДП подвергали обжигу с гидроксидом натрия при 450°C и последующему выщелачиванию при 40°C лимонной кислотой. Таким методом обработки было достигнуто извлечение 100% цинка и 80% свинца.

Коллектив авторов во главе с К. Ли [106] получил сверхмелкозернистый цинковый порошок со средним диаметром около 10 мкм из промышленных отходов, богатых цинком, используя щелочное выщелачивание с NaOH. Извлечение цинка и свинца при выщелачивании составило более 80% и 90%, соответственно. Оставшиеся свинец, олово и алюминий отделяли на стадии очистки при добавлении Na₂S, цинк и CaO. В заключении проводили электролиз раствора сульфата цинка.

Аммиачное выщелачивание. Существуют также способы аммиачного выщелачивания пылей ДСП. Этот способ может быть

применен к металлам (медь, никель и цинк), способным образовывать аммиачные комплексы. Водный раствор аммиака также является основанием, поэтому этот способ относят к щелочным.

При взаимодействии оксида цинка с гидратом аммиака получается гидроксид тетраамминцинка (+2) и вода.



На сегодняшний день аммиачное выщелачивание нашло промышленное применение в производстве меди и никеля. Для извлечения цинка способ также эффективен с точки зрения его селективности по отношению к железу. Если в пыли ЭДП содержатся медь и никель, то они также будут переходить в растворы, однако, как показывает практика, их содержание в пылях ничтожно мало. Существенным недостатком способа к переработке пыли черной металлургии является наличие феррита цинка, который устойчив в таких средах, а, следовательно, извлечение цинка в раствор не превышает 30–40%.

Аммиачное выщелачивание исследовали во многих работах. Так, авторы [112] указывают, что максимальное извлечение цинка было достигнуто при использовании в качестве реагента 2-молярного раствора хлорида аммония при температуре 70°C в течение 2 ч, при этом железо не растворялось и оставалось в остатке выщелачивания в форме Ca₂Fe₂O₅.

В работе [113] выщелачивание проводили в растворе сульфата аммония с концентрацией 4 моль/дм³ при температуре 90°C в течение 4 ч. Было достигнуто извлечение по цинку 85%.

Предложен также способ выщелачивания в растворе соли (NH₄)₂SO₄·Fe(SO₄) в автоклавных условиях при температуре 220°C в течение 10 ч. Извлечение цинка составило 93,2% [114].

Выщелачивание в хлоридных и аммиачно-хлоридных растворах. Известен способ выщелачивания пыли в растворах тиомочевина и холин хлорида под воздействием

ультразвуковой кавитации. Расход растворителя составляет 115 см^3 на 1 г пыли ЭДП. Выщелачивание вели при температуре 60°C , пульпу обрабатывали ультразвуком на установке Hielscher UIP 1000hd мощностью 315 Вт. Согласно [115], ультразвук повышает извлечение цинка, и через 5 мин обработки было достигнуто его извлечение на 25% выше.

Авторы [116] проводили выщелачивание пыли в растворах хлорида аммония с концентрацией $4,93 \text{ моль/дм}^3$ при 80°C в течение 2 ч. Согласно представленным результатам, извлечение цинка в раствор составляет 97%.

Испанская компания «Tecnicas Reunidas SA (TR)» в 1970 г. разработала процесс «ZINCEX», а в конце 1980-х усовершенствовала его до «Modified ZINCEX Process» (MZP).

«ZINCEX» – процесс, позволяющий перерабатывать первичное и вторичное цинковое сырье и извлекать цинк из хлоридной среды в присутствии значительного количества примесей. Основной стадией является жидкостная экстракция, используемая для концентрирования и очистки цинкового раствора, из которого можно получать цинк марки SHG, сульфат и оксид цинка, другие химические соединения. Сначала разработанный ZINCEX-процесс включал две цепочки жидкостной экстракции (анионной и катионной). Из-за сложности его в большинстве случаев заменили на MZP-процесс [117]. Технология включает следующие операции: выщелачивание, экстракцию, промывку, реэкстракцию, стадию регенерации.

Для извлечения цинка из водной фазы в органическую на первой стадии MZP богатый раствор контактирует с органическим раствором. Органическая фаза, состоящая из раствора DEPHA (ди-2-этилгексилфосфорной кислоты) в керосине, способна извлекать цинк по технологии MZP. В условиях, используемых TR, такие примеси, как Co, Cu, Ni, Cd, Mg, Mn, Cl, F и Ca не переходят на следующую стадию процесса, а селективность органической фазы по цинку очень высокая [118].

Захват жидкости и следы соэкстрагирующихся примесей удаляют из органического экстракта подкисленной водой в соответ-

ствующих условиях с получением очень чистого органического экстракта цинка.

Цинк из промытого органического экстракта реэкстрагируют раствором кислоты с получением чистого раствора сульфата цинка, пригодного для получения цинка марки «SHG», ZnSO_4 , ZnO и пр.

Этап регенерации органики частично проводят с использованием раствора HCl , чтобы поддерживать постоянное количество соэкстрагирующихся примесей, например железа, которые не выводятся при промывке и реэкстракции [72].

Хотя эта технология и обеспечивает эффективное и селективное извлечение цинка, все же экстракция является весьма «капризным» процессом, требует строгого соблюдения параметров для поддержания эффективности органической фазы и высокого сквозного извлечения целевого компонента.

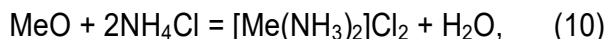
Известна одна из перспективных гидрометаллургических технологий переработки пыли ЭДП – технология «EZINEX», основанная на использовании растворов аммиачных солей, которые более эффективны по сравнению с водными растворами аммиака.

Технология «EZINEX» (от англ. «Engitec Zinc Extraction») была разработана компанией Engitec в Италии в 1993 г. На одном из крупнейших сталелитейных заводов запустили опытную установку, заявленная производительность процесса – до 500 т пыли ЭДП в год. Технология позволяет перерабатывать различные цинксодержащие материалы – пыль из электродуговых печей, оксиды процесса вельцевания, цинковую золу и др. Первую промышленную установку технологии «EZINEX» запустили в 1996 г. с максимальной производительностью 12 тыс. т в год [119].

Процесс включает в себя несколько основных стадий: выщелачивание цинка из пыли ЭДП; очистку раствора от примесей; электроэкстракцию цинка; очистку раствора от хлоридов щелочных металлов.

Выщелачивание пыли проводят отработанным электролитом, содержащим хлориды аммония, щелочных металлов и цинк с концентрацией цинка $10\text{--}15 \text{ г/дм}^3$, в течение 1 ч при температуре процесса около 60°C .

Содержащиеся в пыли оксиды переходят в раствор по реакции:



где Me – Zn, Cd, Cu, Ni, Mn, 2Ag, Ca, Mg.

Свинец растворяется по реакции:



Хлориды натрия и калия просто растворяются в воде, практически не принимая участия в химических реакциях, и повышают общую концентрацию солей в растворе.

Оксид цинка растворяется с высокой скоростью, а феррит цинка и оксиды железа остаются в осадке. Для отделения твердого остатка, содержащего в основном оксиды железа и феррит цинка от электролита, образующуюся пульпу фильтруют на фильтр-прессе.

Кек с влажностью 16–20% подсушивают до влажности не более 10%, смешивают с 15% угольной пыли, гранулируют, сушат до влажности около 5% и возвращают в ЭДП.

Богатый цинком раствор после выщелачивания очищают от растворенных примесей. Из-за существенного различия их свойств очистку раствора перед электролизом проводят в две стадии: сначала цементацией на цинковом порошке осаждают примеси, имеющие более положительный, чем у цинка, потенциал, затем осаждают примеси, не удаляемые на первой стадии.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Переработка вторичного сырья, содержащего более одного целевого металла, является сложным процессом и требует эффективного контроля с настройкой многофакторного анализа.

М. Ву и соавторы [120] описали эффективную систему экспертного контроля для процесса выщелачивания на плавильных заводах цветных металлов. Эта система используется для определения и отслеживания оптимальных уровней pH на основе комбинации математических моделей.

С. Л. Касик и Х. П. Мейснер [121] решили

некоторые проблемы, возникающие в гидрометаллургических процессах, предоставив методы для расчета концентраций ионов, давления пара и пределов растворимости, а также для прогнозирования коэффициентов активности в обычно встречающихся диапазонах температур и часто вплоть до концентраций насыщения.

Коллектив авторов [122] провел сравнительное исследование по выбору выщелачивающего реагента для извлечения металлов из пыли ЭДП с использованием 16 сред – от кислотных (органических и неорганических) до основных. Был сделан вывод, что если рассматривать извлечение основных компонентов – цинка и железа, то аммоний является наиболее селективной средой, в то же время в качестве наиболее экологически чистой среды для выщелачивания была рекомендована лимонная кислота.

ДРУГИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ

Возможна стабилизация состава пылей с переводом в химически инертное состояние с помощью химической обработки или термическое превращение их в стекловидный материал. Это позволяет предотвратить вымываемость вредных веществ атмосферными осадками и хранить полученные материалы на обычных отвалах. После спекания материал возможно применять в строительстве. Однако при этом из пылей ЭДП не извлекается ни цинк, ни свинец, ни железо, и хотя вред, наносимый окружающей среде, снижается, по-прежнему захоронение занимает площади отвалов. Варианты с остеклением пылей ЭДП в данный момент не реализуются из-за экологических сложностей, поскольку при применении в строительстве такие материалы со временем превращаются в тонкую пыль, выделяющую кадмий и свинец.

Р. Л. Найренда [123] привел в своей обзорной статье наиболее распространенные промышленные высокотемпературные технологии и обсудил их экономические преимущества и недостатки.

Ранее пыль ЭДП использовалась для производства удобрений и реагентов, но в настоящее время с ужесточением экологических нормативов и закрытием отвалов вред-

ных отходов исчезают варианты ее утилизации.

Стоит упомянуть недавно появившиеся способы использования пыли черной металлургии, кратко описанные ниже.

Из-за высокой плотности, небольшого размера частиц и низкой удельной поверхности пыли ЭДП авторы [124] использовали добавку ее до 25% в качестве полимерного наполнителя для производства толстого листа для звукоизоляции в автомобильной промышленности.

К. Баренече и другие [125–139] применяли пыль в качестве наполнителя в полимерной матрице для производства плотных листовых материалов с фазовым переходом PCM (от англ. phase change material) – материалов, известных своей способностью накапливать тепло и, таким образом, снижать потребление энергии. Пыль действует как звукоизоляция, а PCM – как теплоизоляция, что делает этот листовый материал подходящим для включения в качестве слоя конструктивной системы для повышения внутреннего комфорта (теплового и акустического) в зданиях при их ремонте. Чтобы установить возможности такого материала, его сравнили с коммерчески доступным листом Texsound от «TEXSA» (Испания), где он показал аналогичные акустические свойства и лучшие тепловые характеристики.

Пыли ЭДП нашлось применение в гражданском строительстве [126, 127]. В работе [128] использовали ее в качестве модификатора для подавления реакций гидратации портландцемента, а также для повышения сопротивления строительных материалов.

Авторы [129] производили керамический материал с использованием глины и до 20% пыли ЭДП. Затем смесь обжигали при температуре от 800 до 1100°C. Они также изучали механическую прочность, линейную усадку, водопоглощение, кажущуюся плотность и прочность на изгиб, а также выщелачивание металлов при различных температурах и составах.

Е. Ф. Ледесма с соавторами [130] герметизировали ЭДП методом стабилизации/затвердевания в растворах на основе цемента. Испытания на выщелачиваемость произве-

денного цементного раствора показали значительное снижение выделения тяжелых металлов, за исключением свинца. М. да Силва Магелаес также показал улучшение механических свойств цементного раствора при добавлении до 5% пыли в растворную смесь [131].

Хотя возможности рециклинга пыли в металлургической отрасли уделяется большее внимание, некоторые исследователи ведут поиски направлений использования пыли в других отраслях [132, 133].

Одним из направлений рециклинга пыли электросталеплавильных печей является ее использование для очистки сточных вод. С. В. Свергузовой в работах [134, 135] исследована возможность использования пыли электросталеплавильного производства Оскольского электросталеплавильного металлургического комбината им. А. А. Угарова для очистки сточных вод от тяжелых металлов. Состав металлургической пыли, %: Fe_{общ} – 40,3; FeO – 8,0; CaO – 14,0; SiO₂ – 8,0; MgO – 5,0; Al₂O₃ – 0,3; MnO – 3,0; C – 2,5; Zn – 1,5; S – 0,49; Pb – 0,4; Cr₂O₃ – 0,28. Эффективность очистки ионов Ni (II) и Cu (II) составляет 99,2 и 99,5%, соответственно, при добавлении 0,15 г пыли на 100 мл. По утверждению авторов, результаты показали высокую эффективность очистки и возможность достижения нормативных требований к сбрасываемым сточным водам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнен литературный обзор разнообразных подходов к переработке пылей электродуговой плавки черной металлургии как сложного материала, являющегося источником тяжелых металлов и железа. Внедрение многих процессов переработки пыли ЭДП столкнулось с техническими или экономическими проблемами, когда получаемые продукты оказывались недостаточного качества или затраты на переработку были несопоставимы с доходом от реализации извлекаемых элементов на рынке.

Пыли ЭДП рассматриваются законодательством разных стран как опасные отходы, поэтому на территории Европы и Северной Америки их захоронение остается под запре-

том или ограничивается, что требует значительных финансовых вложений. Поэтому выбор технологии переработки должен основываться на экономических преимуществах, а также исключении ущерба окружающей среде.

Наиболее широко применяются пирометаллургические технологии, однако большая часть из них не обеспечивает селективность по конкретному металлу, в частности по цинку, вместе с ним возгоняется свинец, а также и другие металлы. Среди основных недостатков можно отметить высокие затраты на топливо (дорогостоящий кокс) и электроэнергию при относительной невысокой стоимости конечных продуктов. Почти во всех пирометаллургических технологиях конечным продуктом является цинк в виде черного оксида цинка, который значительно дешевле металлического цинка и менее востребован.

Наименее изученными, но при этом более перспективными и экологичными являются гидрометаллургические процессы переработки пылей черной металлургии. При этом такие технологии позволяют получать металлический цинк.

Преимуществами гидрометаллургических методов являются низкое энергопотребление, высокая растворимость цинка в различных выщелачивающих агентах и возможность рециклинга остатка в ЭДП. Эти гидрометаллургические процессы более экономичны из-за более низких капитальных и эксплуатационных затрат, но процесс очистки значительно усложняется. Таким образом, основной проблемой остается поиск экономичного и экологически безопасного процесса извлечения цинка и железа из остатков выщелачивания цинка.

С другой стороны, гидрометаллургические методы сталкиваются с недостатком железа, остающегося в растворе при оптимальных условиях выщелачивания больших количеств растворенного феррита цинка, особенно при выщелачивании в кислой среде, отделение которого является технически сложным и финансово затратным процессом.

Аммиачно-хлоридное выщелачивание цинка позволяет относительно селективно извлекать цинк из вельц-возгонов пылей ЭДП. При этом образующийся цинковый электролит пригоден для дальнейшего извлечения цинка электроэкстракцией с получением катодного цинка, который может быть реализован на современном рынке. Оптимизация условий выщелачивания позволяет получать растворы с максимальным содержанием цинка.

Анализ разнообразных гидрометаллургических процессов показал, что они являются перспективными вариантами для обработки таких отходов черной металлургии, как пыли электродуговой плавки с потенциалом высокого извлечения металлов.

В последние годы пыль ЭДП стали использовать в гражданском строительстве в качестве модификатора для цемента, а также как наполнитель листовых звукоизолирующих материалов.

Стоит иметь в виду, что для получения конкретных рекомендаций по переработке определенного типа пыли необходимы предварительные исследования с уточнением ее химического и фазового составов и разработка программы пилотных испытаний на производстве.

Список источников

1. Леонтьев Л. И., Дюбанов В. Г. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 32–35.
2. Перескока В. В., Камкина Л. В., Пройдак Ю. С., Стовпченко А. П., Квичанскан М. И. Восстановительно-тепловая обработка пыли электрофильтров дуговой сталеплавильной печи // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. Вып. 21. С. 13–16.
3. Шалимов А. Г. Установка для обработки пыли, об-

- разующейся в электродуговой печи // Новости черной металлургии за рубежом. 2001. № 1. С. 47–48.
4. Адоньев С. М., Филиппов О. В. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. М.: Металлургия, 1973. 200 с.
5. Киселев А. Д., Тулуевский Ю. Н., Зинуров И. Ю. Повышение эффективности газоудаления дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1992. 112 с.
6. Стовпченко А. П., Камкина Л. В., Пройдак Ю. С., Дервянченко И. В., Кучеренко О. Л., Бондаренко М. Ю. Теоретические и экспериментальные исследования состава и

восстановимости пыли дуговых сталеплавильных печей // Электromеталлургия. 2009. № 8. С. 29–36.

7. Патрушов А. Е., Немчинова Н. В., Черных В. Е., Тютрин А. А. Современные методы переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 183–190. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>.

8. Nemchinova N. V., Chernykh V. E., Tyutrin A. A., Patrushov A. E. Extraction of Zinc and Iron from Electrosmelting Dust // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 5. P. 368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>.

9. Machado J. G. Characterization study of electric arc furnace dust phases // Materials Research. 2006. Iss. 1. P. 30–36. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.

10. Machado J. G. M. S., Brehm F. A., Moraes C. A. M., dos Santos C. A., Vilela A. C. F., da Cunha J. B. M. Characterization study of electric arc furnace dust phases // Materials Research. 2006. Vol. 136. Iss. 3. P. 953–960. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.

11. Zunkel A. D. Recovering zinc and lead from electric arc furnace dust: a technology status report // 4th International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials / eds. D. L. Jr. Stewart, J. C. Daley, R. L. Stephens. Warrendale: Minerals, Metals & Materials Society, 2000. P. 227–236.

12. Coman V., Robotin B., Ilea P. Nickel recovery/removal from industrial wastes: a review // Resources, Conservation and Recycling. 2013. Vol. 73. P. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.019>.

13. Gajski G., Oreščanin V., Garaj-Vrhovac V. Chemical composition and genotoxicity assessment of sanitary landfill leachate from Rovinj, Croatia // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2012. Vol. 78. P. 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.032>.

14. Симонян Л. М., Хилько А. А., Лысенко А. А., Михалчан А. А., Сельникова П. Ю. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 11. С. 68–75.

15. Rizescu C.-Z., Bacinschi Z., Stoian E.-V., Poinescu A.-A. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Tunisia/WWAI/WWAI-25.pdf> (18.03.2021).

16. Недин В. В., Нейков О. Д., Алексеев А. Г., Кривцов В. А. Взрывоопасность металлических порошков. Киев: Наукова думка, 1971. 140 с.

17. Зайцев А. К., Похвиснев Ю. В. Экология и ресурсосбережение в черной металлургии // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 3. С. 52–58.

18. Черноусов П. И. Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии: монография. М.: ИД «МИ-СиС», 2011. 428 с.

19. Доронин И. Е., Свяжин А. Г. Промышленные способы переработки сталеплавильной пыли // Металлург. 2010. № 10. С. 48–53.

20. Козлов П. А., Затонский А. В., Паньшин А. М. Ис-

следования и разработка технологии по удалению примесей из вельц-окси, полученной после переработки пылей ЭДП // Инновационные разработки в горно-металлургической отрасли: матер. VI Междунар. конф.: в рамках IX Междунар. выставки «MinTech-2011» (г. Усть-Каменогорск, 19 мая 2011 г.). Усть-Каменогорск: Изд-во Вост.-Казахст. техн. ун-та им. Д. Серикбаева, 2011. С. 189–193.

21. Kozlov P. A. The Waelz process. М.: ИД «Руда и Металлы», 2003. 160 p.

22. Gunter M., Vopel K.-H., Janssen W. Untersuchungen zur verwertung von stauben und schlammern aus den abgasreinigungen von hochofen- und blasstahlwerken im drehrohrfurnen // Stahl und Eisen. 1976. Vol. 96. No. 24. P. 1228–1238.

23. Грудинский П. И., Корнеев В. П., Дюбанов В. Г. Карботермическое восстановление пыли электроплавки стали с извлечением цветных металлов и железа // V Междунар. конф.-шк. по хим. технологии (ХТ'16): тез. докл. (г. Волгоград, 16–20 мая 2016 г.). Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2016. Т. 2. С. 171–172.

24. Kozlov P. A., Povysheva E. V., Zolkina A. V., Vorobiev A. G. Modern situation and perspectives of waelz-process usage for zinc extraction from dust of electric arc furnaces // Цветные металлы. 2009. № 7. С. 36–40.

25. Panshin A., Kozlov P. Research and development of complex technology for zinc and indium recovery from oxidized raw material and waste utilization // Lead-Zinc 2010: Proceedings of 49-th Annual Conference of Metallurgists (Vancouver, 3–6 October 2010). Vancouver, 2010. P. 1255–1261.

26. Naimanbayev M. A., Lokhova N. G., Abisheva A. E., Maldybayev G. K., Barkytova B. N. Effect of some conditions of charge preparation on zinc distillation from oxidized ore // Complex Use of Mineral Resources. 2017. No. 1. С. 40–46.

27. Котенев В. И., Барсукова Е. Ю. Брикеты из мелкодисперсных отходов металлургического и коксохимического производства - экономически выгодная замена традиционной шихты металлургических переделов // Металлург. 2002. № 10. С. 42–45.

28. Бабанин В. И., Еремин А. Я., Бездежский Г. Н. Разработка и внедрение новой технологии брикетирования мелкофракционных материалов с жидким стеклом. Часть 1 // Металлург. 2007. № 1. С. 68–71.

29. Быстров В. А., Новиков Н. И. Инновации путь повышения конкурентоспособности металлургических предприятий // Вестник Кемеровского государственного университета. 2010. № 1. С. 47–53.

30. Летимин В. Н., Насыров Т. М., Макарова И. В. Оценка пирометаллургических способов обесцинкования пыли и шламов сталеплавильных цехов // Теория и технология металлургического производства. 2013. № 1. Т. 13. С. 67–70.

31. Пат. № 2484153, Российская Федерация, МПК C22B7/02, C22B19/30. Способ утилизации пыли электросталеплавильных печей / С. И. Иваница, С. И. Логиновских, В. А. Мальцев, С. А. Меламуд, А. В. Мокрецов, Д. Ю. Храмов; заявитель и патентообладатель С. И. Иваница, С. И. Логиновских, А. В. Мокрецов, Д. Ю.

Храмов. Заявл. 09.08.2010; опубл. 10.06.2013. Бюл. № 16.

32. Пат. № 2507280, Российская Федерация, МПК C22B19/38, C22B1/02, C22B7/00. Способ переработки цинксодержащих металлургических отходов / В. Г. Дюбанов, А. В. Затонский, П. А. Козлов, Л. И. Леонтьев, А. М. Паньшин, Ю. В. Решетников; заявитель и патентообладатель ОАО «Челябинский цинковый завод». Заявл. 05.09.2016; опубл. 26.07.2017. Бюл. № 23.

33. Найманбаев М. А., Лохова Н. Г., Балтабекова Ж. А., Баркытова Б. Н. О возможности переработки цинксодержащих пылей ЗСМК и Северстали с рудой месторождения Шаймерден // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: тр. III Конгр. с междунар. участием и Конференции молодых ученых V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов» (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017 г.). Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 178–182.

34. Ким В. А., Торговец А. К., Джундибаев М. К., Кударинов С. К., Богоявленская О. А., Нурмуханбетов Ж. У. Получение низкофосфорного спецкокса для электротермического производства из неспекающихся углей Шубаркольского месторождения // Повышение технического уровня горно-металлургических предприятий на основе инновационных технологий: материалы VII Междунар. конф. (г. Усть-Каменогорск, 2013 г.). Усть-Каменогорск. 2013. С. 296–298.

35. Смирнов Л. А. Разработка комплексной схемы утилизации железосодержащих отходов // Сталь. 2001. № 1. С. 89–90.

36. Ульянов В. П., Булавин В. И., Дмитриев В. Я., Артамонов А. П. Экономическая оценка технологического процесса комплексной переработки железосодержащих пылей и шламов металлургических переделов с получением металлизированных окатышей // Интеграция технологий та энергосбережения. 2013. No. 1. С. 91–96.

37. Ким В. А., Требухова Т. А., Ким С. В., Бивойно Д. Г. Новый углеродный восстановитель карбонизат рексил для металлизации железосодержащего сырья // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований, V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов»: тр. Конгресса с междунар. участием и Конференции молодых ученых (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017). Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 212–214.

38. Паньшин А. М., Шакирзянов Р. М., Избрехт П. А., Затонский А. В. Основные направления совершенствования производства цинка на ОАО «Челябинский цинковый завод» // Цветные металлы. 2015. № 5. С. 19–21. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.

39. Panshin A. M., Kozlov P. A., Shakirzyanov R. M., Zatonsky A. V., Kongoli F. Development and implementation of a new technology for recycling of metallurgical wastes with the recovery of zinc, lead, tin and iron // Shechtman International Symposium: 2014 Sustainable Industrial Processing. 2014. Vol. 4. P. 309–315.

<https://doi.org/10.13140/2.1.1602.0800>.

40. Шалимов А. Г. Рециркуляция отходов черной металлургии // Новости черной металлургии за рубежом. 2000. № 3. С. 53–55.

41. Демин А. В., Рожков А. И., Грудницкий О. М., Николаев В. В., Феклистов А. В. Поиск способов утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на Белорусском металлургическом заводе // Литье и металлургия. 2015. № 3. С. 76–80.

42. Каширина А. О., Ростовский В. И. Утилизация цинксодержащих сталеплавильных пылей и шламов // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: V Междунар. науч. конф. аспирантов и студентов (г. Донецк, 11–13 апреля 2006 г.). Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2006. Т. 1. С. 58–59.

43. Chacrabarti A. K. Steel Making. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2012. 240 p.

44. Лопухов Г. А. Получение более качественной пыли в дуговых печах фирмами «Крупп» и «ДДС» // Новости черной металлургии за рубежом. 1997. № 2. С. 59–63.

45. Рожкова А. И., Ермакова Е. В. Поиск способов утилизации пыли дуговых сталеплавильных печей на Белорусском металлургическом заводе. Часть третья. Опыты по брикетированию пыли дуговых сталеплавильных печей // Литье и металлургия. 2015. № 4. С. 93–97.

46. Вишкарев А. Ф. Рециклинг пыли и шламов в конвертерных цехах // Новости черной металлургии за рубежом. 1996. № 3. С. 70–72.

47. Годанский Н. А. Опыт использования железосодержащих брикетов в сталеплавильном производстве // Металлург. 2003. № 1. С. 43–45.

48. Пат. № 2626371, Российская Федерация, МПК C22B7/02, C21B11/06, C22B19/38. Способ переработки отходов металлургического производства / С. Ю. Одегов, И. Б. Федосов, А. П. Баранов, В. Е. Черных, А. Е. Патрушов; заявитель и патентообладатель ООО «Урал-рециклинг». № 2016135884; заявл. 05.09.2016; опубл. 26.07.2017. Бюл. № 21.

49. Якорнов С. А., Паньшин А. М., Козлов П. А., Ивакин Д. А. Современное состояние переработки пылей электродуговых печей в России и за рубежом // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований, V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов»: Труды III Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017 г.). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2017. С. 64–69.

50. Kikuchi S., Ito S., Kobayashi I., Tsuge O., Tokuda K. ITmk3® Process // Kobelco technology review. 2010. No. 29. P. 77–84.

51. Kobayashi I., Tanigaki Y., Liagami A. A new process to produce iron directly from fine ore and coal // Iron and Steelmaker. 2001. No. 9. P. 19–22.

52. Dubrovsky V. A., Starikov A. I., Panishev N. V., Redin E. V., Knyazev E. V. Direct Reduction of TI-V Magnetite via ITmk3 Technology // 4th International symposium on high-temperature metallurgical processing (San Antonio, 3–7 March 2013). San Antonio, 2013. P. 45–48.

53. Дубровский Б. А., Шиляев П. В., Редин Е. В. Металлизация шпатовых железняков Бакальского месторождения с получением гранулированного чугуна // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию ММК (г. Москва, 15–20 октября 2012 г.). М., 2012. С. 178–182.
54. Юнес Р., Опрышко И. А., Лобода П. И. Анализ технологий прямого восстановления оксидов металлов с применением печей с вращающимся подом // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». 2011. № 61. С. 184–192.
55. Gordon Y., Els J. ITmk3 technology and its application for mining and steel industry in Ukraine and Russia // International Conference on Ironmaking Technology (Kyiv, 21 March 2007). Kyiv, 2007. P. 128–131.
56. Tanaka H., Miyagawa K., Harada T. FASTMET, FASTMELT and ITmk3: development of new coal-based ironmaking processes // RHF Technologies. 2011. No. 5. P. 15–19.
57. Панишев Н. В., Бигеев В. А., Черняев А. А. Переработка мелкозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна и извлечением цинка // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 4. С. 26–29.
58. Clelland J. M., Metius G. E. Recycling ferrous and nonferrous waste streams with Fastmet // Journal of the minerals, metals and materials Society. 2003. No. 8. P. 30–34.
59. Tsutsumi H., Yoshida S., Tetsumoto M. Features of FASTMET® Process // Kobelco technology review. 2010. 29. P. 85–92.
60. Баранов А. П., Федосов И. Б., Тлехугов Н. В. Перспективы промышленного рециклинга цинксоодержащей пыли электрометаллургического производства в России // Металлургия-Интехэко-2014: сб. докл. и каталог участников VII Междунар. конф. (г. Москва, 25–26 марта 2014 г.). М.: ООО «Интехэко», 2014. С. 71–76.
61. Баранов А. П. Экологические проблемы при переработке цинксоодержащей пыли дуговых сталеплавильных печей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2012. № 7. С. 91–95.
62. Daiga V. R., Home D. A. Production of crude zinc oxide from steel mill waste oxides using a rotary health furnace // Recycling of Metals and Engineered Materials / eds. D. L. Stewart, J. C. Daley, R. L. Stephens. Warrendale: TMS, 2000. P. 361–368. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch31>.
63. Money K. L., Hanewald R. H., Bleakney R. R. Processing steel wastes pyrometallurgically at Inmetco // Recycling of Metals and Engineered Materials / eds. Stewart D. L., Daley J. C., Stephens R. L. 2013. P. 28–35. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch34>.
64. Pargeter J. K., Hanewald R. H., Dombrowski D. E. Operating experience at INMETCO and application of the process to the production of DRI // Conservation & Recycling. 1985. Vol. 8. No. 13. P. 363–375. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(85\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0361-3658(85)90006-2).
65. Borlée J., Steyls D., Colin R., Munnix R., Economopoulos M. Comet: un procédé utilisant du charbon pour produire une éponge de fer de qualité à partir de minerai fin // Revue de Métallurgie. 1999. Vol. 96. No. 3. P. 331–340. <https://doi.org/10.1051/metal/199996030331>.
66. Chatterjee A., Banshidhar P. *Metallurgy for steelmaking: production and use*. New Delhi: Allied Publishers LTD, 2001. 732 p.
67. Ковалев В. Н. Технология комплексной переработки цинксоодержащей пыли и шлама с получением металлургического чернового цинка и железа // Сталь. 2013. № 2. С. 72–76.
68. Кологриев К. А. Обесцинкование шламов и пылей в процессе агломерации под давлением // Международный симпозиум, посвященный проблеме комплексной переработки техногенных отходов металлургического производства (г. Москва, 8 октября 2009 г.). М.: Изд-во ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2009. С. 49–52.
69. Schoukens A. F. S., Jones R. T., Denton G. M. Pilot-plant production of Prime Western grade zinc from lead blast-furnace slag using the Enviroplas process // Recycling of Metals and Engineered Materials, Third International Symposium: Third International Symposium (Point Clear, Alabama, November 1995). Point Clear, Alabama, 1995. P. 857–868.
70. Леонтьев В. Г. Высокоинтенсивный процесс переработки цинксоодержащих техногенных отходов плавкой в самовспенивающейся оксидной ванне // Международный симпозиум, посвященный проблеме комплексной переработки техногенных отходов металлургического производства (г. Москва, 8 октября 2009 г.). М.: Изд-во ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2009. С. 62–65.
71. Мельниченко И. А., Куренков Д. С., Липина А. В. Выщелачивание цинка из пыли шламовых отвалов сталеплавильного производства предприятий горно-металлургического комплекса с последующим электролизом // Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов: матер. XII науч.-практ. конф. (г. Москва, 12 ноября 2015 г.). М.: ВНИИМЕТМАШ, 2016. С. 372–378.
72. Тарасов А. В., Бессер А. Д., Мальцев В. И. Металлургическая переработка вторичного цинкового сырья. М.: Гинцветмет. 2004. 219 с.
73. Johansson L.-G. CONTOP now at MEFOS // Newsletter from mefos - the foundation for metallurgical research. 2010. No. 1. P. 2–5.
74. Both I., Houbart M., Roth J.-L. Advanced technologies for residue treatment - successful start-up of the PRIMUS® plant of Dragon Steel in Taiwan // Iron & Steel technology conference: British Library Conference Proceedings (Pittsburgh, 2010). Pittsburgh, 2010. P. 209–216.
75. Лошкарев А. Н., Матюнина Е. В. Внедрение процесса ПРАЙМУС (PRIMUS) в ДСП-80 ОАО «Металлургический завод им. А. К. Серова» // Теплотехника и

информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2015) с междунар. участием, посвященной 95-летию основания кафедры и университета (г. Екатеринбург, 26–27 марта 2015 г.). Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. С. 93–95.

76. Bratina J. E., Lenti K. M. PIZO furnace demonstration operation for processing EAF dust // *Iron & Steel Technology*. 2007. No. 4. P. 118–122.

77. Holtzer M., Kmita A., Rocznik A. The recycling of materials containing iron and zinc in the oxycup process // *Archives of Foundry Engineering*. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 126–130.

78. Fleischanderl A., Gennari U., Ilie A. ZEWA - metallurgical process for treatment of residues from steel industry and other industrial sectors to generate valuable products // *Ironmaking & Steelmaking*. 2004. No. 6. P. 444–449. <https://doi.org/10.1179/irs.2004.31.6.444>.

79. Schoukens A. F. S., Nelson L. R., Barcza N. A. Plasma-arc treatment of steel-plant dust and zinc-containing slag - theoretical and practical considerations // *Recycling of lead and zinc the Challenge of the 1990s: Proceedings of the International Conference (Rome, 11–13 June 1991)*. Rome, 1991. P. 361–370.

80. Архипова Л. В., Федоров А. Н. Выщелачивание цинка из пыли сталеплавильного производства с использованием NaOH // 70-е Дни науки студентов НИТУ «МИСиС»: сб. статей / под ред. М. Г. Рахутина, А. С. Вознесенского, С. И. Диденко, Д. В. Кузнецова, П. В. Петровского, А. В. Алпатова. М.: ИД «МИСиС», 2015. С. 93–95.

81. Barcza N. A., Robertson D. G. C., Schoukens A. F. S., Shaw F., Denton G. M., Worcester T. W., Bailey D. J. Enviropas technology for the recovery of lead and zinc from lead blast-furnace slags // *Recycling Lead and Zinc into the 21st Century: Proceedings of the 6th International Conference (Madrid, 18–23 June 1995)*. Madrid: International Lead and Zinc Study Group, 1995. P. 296–312.

82. Серегин П. С., Попов В. А., Цемехман Л. Ш. Новые методы переработки материалов, содержащих цинк, олово и свинец // *Цветные металлы*. 2010. № 10. С. 27–33.

83. Блинкова Е. В., Елисеев Е. И. Кинетика растворения оксида цинка в водных растворах уксусной кислоты // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2005. № 5. С. 8–10.

84. Havlík T., Souza B. V., Bernardes A. M., Schneider I. A. H., Mišková A. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 135. No. 1-3. P. 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>.

85. Havlik T., Turzakova M., Stopić S., Friedrich B. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid // *Hydrometallurgy*. 2005. Vol. 77. No. 1. P. 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>.

86. Yoshida T. Leaching of zinc oxide in acidic solution // *Materials Transactions*. 2003. Vol. 44. No. 12. P. 2489–2493. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.2489>.

87. Özverdi A., Erdem M. Environmental risk assessment and stabilization/solidification of zinc extraction residue: I. Environmental risk assessment // *Hydrometallurgy*. 2010. Vol. 100. Iss. 3-4. P. 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.011>.

88. Ye Guozhu, White J. F., Wei L. Y. Association of halogens in electric arc furnace dust and zinc oxide fume before and after leaching // *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology (REWAS 1999): Proceedings Extraction and Process Metallurgy Meeting (San Sebastián, 5–9 September 1999)*. San Sebastián, 1999. P. 1503–1510.

89. Cruells M., Roca A., Núnēz C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid // *Hydrometallurgy*. 1992. Vol. 31. Iss. 3. P. 213–231. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K)

90. Yan Huan, Chai Li-yuan, Peng Bing, Li Mi, Peng Ning, Hou Dong-ke. A novel method to recover zinc and iron from zinc leaching residue // *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 55. P. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.015>.

91. Oustadakis P., Tsakiridis P. E., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): part I: characterization and leaching by diluted sulphuric acid // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 179. No. 1-3. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.059>.

92. Langová Š., Rípková J., Vallová S. Atmospheric leaching of steel-making wastes and the precipitation of goethite from the ferric sulphate solution // *Hydrometallurgy*. 2007. Vol. 87. No. 3-4. P. 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.002>.

93. Tsakiridis P. E., Oustadakis P., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: downstream processing and zinc recovery by electrowinning // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 179. Iss. 1-3. P. 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.004>.

94. Langová Š., Matýšek D. Zinc recovery from steel-making wastes by acid pressure leaching and hematite precipitation // *Hydrometallurgy*. 2010. Vol. 101. Iss. 3-4. P. 171–173. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.003>.

95. Xanthopoulos P., Agatzini-Leonardou S., Oustadakis P., Tsakiridis P. E. Zinc recovery from purified electric arc furnace dust leach liquors by chemical precipitation // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017. Vol. 5. Iss. 4. P. 3550–3559. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.023>.

96. Rao S. R. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. Montreal: Elsevier Science, 2006. 580 p.

97. Van Weert G., Peek E. M. L. Reagent recovery in chloride hydrometallurgy - some missing links // *Hydrometallurgy*. 1992. Vol. 29. Iss. 1-3. P. 513–526. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90030-4).

98. Langová Š., Leško J., Matýšek D. Selective leaching of zinc from zinc ferrite with hydrochloric acid // *Hydrometallurgy*. 2009. Vol. 95. Iss. 3-4. P. 179–182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.040>.

99. Jerzy G., Ostrowska P. Leaching of EAF dust with

- acidic solutions // *Ars Separatoria Acta* 2005: Proceedings of the XXth International Symposium on Physico-Chemical Methods of the Mixtures Separation (Szklarska, 20–23 June 2003). Szklarska Poręba, 2005.
100. Катренов Б. Б., Жумашев К. Ж., Нарембекова А. К., Мусина А. Е. Определение оптимальных параметров обесцинкования конвертерного шлама растворов соляной кислоты // *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований*, V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов»: тр. Конгресса с междунар. участием и Конференции молодых ученых (г. Екатеринбург, 5-9 июня 2017). Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 174–177.
101. Patente no. 5.980.842, United States. Separation of calcium from metal compounds / Jr. W. F. Drinkard, H. J. Woerner. Depose 28.02.1997; publ. 04.09.1997.
102. Vazarlis H. G. Hydrochloric acid-hydrogen peroxide leaching and metal recovery from a Greek zinc-lead bulk sulphide concentrate // *Hydrometallurgy*. 1987. Vol. 19. Iss. 2. P. 243–251. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0304-386X(87)90008-9).
103. Barrett E. C., Nenniger E. H., Dziwinski J. A hydro-metallurgical process to treat carbon steel electric arc furnace dust // *Hydrometallurgy*. 1992. Vol. 30. Iss. 1-3. P. 59–68. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90077-D](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90077-D).
104. Leclerc N., Meux E., Lecuire J. M. Hydrometallurgical recovery of zinc and lead from electric arc furnace dust using mononitritotriacetate anion and hexahydrated ferric chloride // *Journal of Hazardous Materials*. 2002. Vol. 91. No. 1-3. P. 257–270. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00394-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00394-6).
105. Youcai Zhao, Stanforth R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium // *Journal of Hazardous Materials*. 2001. Vol. 80. No. 1-3. P. 223–240. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00305-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00305-8).
106. Li Qiang, Zhao Youcai, Jiang Jiachao, Zhang Chenglong. Optimized hydrometallurgical route to produce ultrafine zinc powder from industrial wastes in alkaline medium // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. Vol. 16. P. 674–682. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.093>.
107. Пат. № 2617086, Российская Федерация, МПК C22B 19/00 (2006.01), C22B 7/00 (2006.01), C22B 3/12 (2006.01). Способ селективного извлечения оксида железа и оксида цинка из шламов и пылей газоочисток металлургических агрегатов / Г. А. Фарнасов, В. И. Ковалев, И. Ф. Курунов, А. М. Бижанов, И. Н. Вершинин; заявитель и патентообладатель Г. А. Фарнасов, А. М. Бижанов. № 2016108792; заявл. 11.03.2016; опублик. 19.04.2017. Бюл. № 10.
108. Dutra A. J. B., Paiva P. R. P., Tavares L. M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust // *Minerals Engineering*. 2006. Vol. 19. Iss. 5. P. 478–485.
109. Larba R., Boukerche I., Alane N., Habbache N., Djerad S., Tifouti L. Citric acid as an alternative lixiviant for zinc oxide dissolution // *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 134–135. P. 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.002>.
110. Бигеев В. А., Сергеев Д. С., Колесников Ю. А. Возможности использования мелкодисперсных, железосодержащих отходов металлургии // *Литейные процессы*. 2014. № 13. С. 35–39.
111. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium // *Hydrometallurgy*. 2005. Vol. 78. Iss. 3-4. P. 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>.
112. Zhang Duchao, Zhang Xinwang, Yang Tianzu, Rao Shuai, Hu Wei, Liu Weifeng, et al. Selective leaching of zinc from blast furnace dust with mono-ligand and mixed-ligand complex leaching systems // *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 169. P. 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.003>.
113. Halli P., Hamuyuni J., Leikola M., Lundström M. Developing a sustainable solution for recycling electric arc furnace dust via organic acid leaching // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 124. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.011>.
114. Фидаров Б. Ф., Петров Г. В. Ферритсодержащие техногенные отходы металлургических производств // Неделя науки СПбПУ: матер. Науч. конф. с междунар. участием Института металлургии, машиностроения и транспорта (г. Санкт-Петербург, 14–19 ноября 2016 г.). СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. С. 125–128.
115. Tang Mo-tang, Zhang Peng, He Jing, Yuan Xia, Chen Yong-ming. Leaching zinc dust in system of Zn(II)-(NH₄)₂SO₄-H₂O // *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2007. Vol. 38. No. 5. P. 867–872.
116. Wang Hui-gang, Jia Nannan, Liu Wenwu, Zhang Mei, Guo Min. Efficient and selective hydrothermal extraction of zinc from zinc-containing electric arc furnace dust using a novel bifunctional agent // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 16. P. 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.013>.
117. Chen Dong, Sharma S. K., Mudhoo A. Handbook on applications of ultrasound: sonochemistry for sustainability. New York: CRC Press, 2012. 744 p.
118. Попов А. А., Петров Г. В. Утилизация цинксодеждающей пыли сталеплавильных производств // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 4. С. 177–185. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-4-177-185>.
119. Steer J. M., Griffiths A. J. Investigation of carboxylic acids and non-aqueous solvents for the selective leaching of zinc from blast furnace dust slurry // *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 140. P. 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.08.011>.
120. Dutrizac J. E. Zinc and lead processing // 37th Annual Conference of Metallurgists of CIM: Proceedings of an International Symposium (Calgary, 16–19 August 1998). Calgary: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1998. P. 886.
121. Diaz G., Martin D. Modified Zincex process: the clean, safe and profitable solution to the zinc secondaries treatment // *Resources, Conservation and Recycling*. 1994. Vol. 10. Iss. 1-2. P. 43–57. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90037-X).

122. Wu Min, Nakano M., She Jin-Hua. A model-based expert control system for the leaching process in zinc hydrometallurgy // *Expert Systems with Applications*. 1999. Vol. 16. Iss. 2. P. 135–143. [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(98\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(98)00062-1).
123. Kusik C. L., Meissner H. P. Calculating activity coefficients in hydrometallurgy – a review // *International Journal of Mineral Processing*. 1975. Vol. 2. Iss. 2. P. 105–115. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(75\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0301-7516(75)90015-0)
124. Halli P., Hamuyuni J., Revitzer H., Lundström M. Selection of leaching media for metal dissolution from electric arc furnace dust // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 164. P. 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.212>.
125. Nyirenda R. L. The processing of steelmaking flue-dust: a review // *Minerals Engineering*. 1991. Vol 4. Iss. 7-11. P. 1003–1025. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90080-F](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90080-F)
126. Niubó M., Fernández A. I., Chimenos J. M., Haurie L. A possible recycling method for high grade steels EAFD in polymer composites // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 171. No. 1-3. P. 1139–1144. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.126>.
127. Barreneche C., Fernández A. I., Niubó M., Chimenos J. M., Espiell F., Segarra M. et al. Development and characterization of new shape-stabilized phase change material (PCM) - Polymer including electrical arc furnace dust (EAFD), for acoustic and thermal comfort in buildings // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 61. P. 210–214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.026>
128. Nazari A., Shafyei A., Saidi A. Recycling of electric arc furnace dust into glass ceramic // *Materials Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 205. P. 436–441. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.045>.
129. Cholake S. T., Farzana R., Numata T., Sahajwalla V. Transforming electric arc furnace waste into value added building products // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 171. P. 1128–1139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.084>.
130. Vargas A. S., Masuero A. B., Vilela A. C. F. Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes // *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36. No. 10. P. 1833–1841. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.003>
131. Machado A. T., Valenzuela-Díaz F. R., Souza C. A. C., Andrade Lima L. R. P. Structural ceramics made with clay and steel dust pollutants // *Applied Clay Science*. 2011. Vol. 51. Iss. 4. P. 503–506. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.004>.
132. Ledesma E. F., Lozano-Lunar A., Ayuso J., Galvín A. P., Fernández J. M., Jiménez J. R. The role of pH on leaching of heavy metals and chlorides from electric arc furnace dust in cement-based mortars // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 183. P. 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.175>
133. Silva Magalhães M., Faleschini F., Pellegrino C., Brunelli K. Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 157. P. 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.074>.
134. Khattab R. M., El-Sayed Seleman M. M., Zawrah M. F. Assessment of electric arc furnace dust: powder characterization and its sinterability as ceramic product // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. Iss. 15. P. 12939–12947. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.192>
135. Артёмов А. В., Ружицкий А. О. Получение и использование дисперсных магнитных металлов в качестве катализаторов жидкофазных окислительных процессов [Электронный ресурс]. URL: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/004.htm> (15.05.2021).
136. Свергузова С. В., Лашина О. Д. Использование пыли электросталеплавильных печей для очистки сточных вод от ионов никеля и меди // *Экология и промышленность России*. 2008. № 4. С. 46–47.
137. Свергузова С. В., Порожнюк Л. А., Ипанов Д. Ю., Шамшуров А. В., Новикова Е. В. Коллоидно-химические свойства пыли ЭДСП в процессах водочистки // *Экология и промышленность России*. 2013. № 7. С. 22–25.
138. Kukurugya F., Vindt T., Havlik T. Behavior of zinc, iron and calcium from electric arc furnace (EAF) dust in hydrometallurgical processing in sulfuric acid solutions: thermodynamic and kinetic aspects // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 154. P. 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.008>.
139. Vereš J., Jakabský Š., Lovas M. Zinc recovery from iron and steel making wastes by conventional and microwave assisted leaching // *Acta Montanistica Slovaca*. 2011;16(3):185–191.

References

1. Leont'ev L. I., Dyubyanov V. G. Technogenic waste of ferrous and nonferrous metallurgy and environmental problems. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2011;4:32-35. (In Russ.).
2. Pereskoka V. V., Kamkina L. V., Projdak Y. S., Stovpchenko A. P., Kvichanska M. I. Reducing and thermal treatment of electric filter dust of electric arc furnace. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tehnicheskie nauki = Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. 2010;21:13-16.
3. Shalimov A. G. Device for processing electric arc furnace dust. *Novosti chyornoj metallurgii za rubezhom*. 2001;1:47-48. (In Russ.).
4. Adon'ev S. M., Filip'ev O. V. *Dust and gas emissions from ferrous metallurgy enterprises*. Moscow: Metallurgiya; 1973, 200 p. (In Russ.).
5. Kiselev A. D., Tuluevskij Yu. N., Zinurov I. Yu. *Improving gas removal efficiency of arc steel-making furnaces*. Moscow: Metallurgiya; 1992, 112 p. (In Russ.).
6. Stovpchenko A. P., Kamkina L. V., Projdak Yu. S., Derevyanchenko I. V., Kucherenko O. L., Bondarenko M.

- Yu. *Theoretical and experimental studies of the composition and reducibility of dust in arc steel-making furnaces. Elektrometallurgiya*. 2009;8:29-36. (In Russ.).
7. Patrushov A. E., Nemchinova N. V., Chernykh V. E., Tyutrin A. A. Modern processing methods of technogenic raw materials of electric furnace steelmaking. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(4):183-190. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>.
8. Nemchinova N. V., Chernykh V. E., Tyutrin A. A., Patrushov A. E. Extraction of zinc and iron from electrosmelting dust. *Steel in Translation*. 2016;46(5):368-372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>.
9. Machado J. G. Characterization study of electric arc furnace dust phases. *Materials Research*. 2006;1:30-36. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.
10. Machado J. G. M. S., Brehm F. A., Moraes C. A. M., dos Santos C. A., Vilela A. C. F., da Cunha J. B. M. Characterization study of electric arc furnace dust phases. *Materials Research*. 2006;13(3):953-960. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.
11. Zunkel A. D. Recovering zinc and lead from electric arc furnace dust: a technology status report. In: Stewart DL Jr, Daley JC, Stephens RL (eds). *4th International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials*. Warrendale: Minerals, Metals & Materials Society; 2000, p. 227-236.
12. Coman V., Robotin B., Ilea P. Nickel recovery/removal from industrial wastes: a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;73:229-238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.019>.
13. Gajski G., Orešćanin V., Garaj-Vrhovac V. Chemical composition and genotoxicity assessment of sanitary landfill leachate from Rovinj, Croatia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012;78:253-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.032>.
14. Simonyan L. M., Hil'ko A. A., Lysenko A. A., Mihalchan A. A., Sel'nikova P. Yu. Electric steel-smelting dust as a dispersed system. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010;11:68-75. (In Russ.).
15. Rizescu C.-Z., Bacinschi Z., Stoian E.-V., Poinescu A.-A. Characterization of steel mill electric arc furnace dust. Available from: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Tunisia/WWAI/WWAI-25.pdf> [Accessed 18th March 2021].
16. Nedin V. V., Nejkov O. D., Alekseev A. G., Krivcov V. A. *Explosion hazard of metal powders*. Kiev: Naukova dumka; 1971, 140 p.
17. Zaytsev A. K., Pokhvisnev Yu. V. Ecology and recycling in ferrous metallurgy. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*. 2001;7(3):52-58. (In Russ.).
18. Chernousov P. I. *Technologies for ferrous metallurgy technogenic formations and waste processing and recycling*. Moscow: MISiS; 2011, 428 p. (In Russ.).
19. Doronin I. E., Svyazhin A. G. Industrial methods of steel-melting dust processing. *Metallurg*. 2010;10:48-53. (In Russ.).
20. Kozlov P. A., Zaton'skij A. V., Pan'shin A. M. Research and development of technology for removing impurities from Waelz-oxide obtained after processing of Zinc-containing dust from electric arc furnaces. In: *Innovacionnye razrabotki v gorno-metallurgicheskoy otrasli: materialy VI Mezhdunarodnoj konferencii: v ramkah IX Mezhdunarodnoj vystavki «MinTech-2011» = Innovative developments in the Mining and Metallurgical industry: proceedings of the VI International conference: within the framework of the IX International exhibition 'MinTech-2011'*. 19 May 2011, Ust'-Kamenogorsk. Ust'-Kamenogorsk: D. Serikbayev East Kazakhstan technical university; 2011, p. 189-193.
21. Kozlov P. A. *The Waelz process*. Moscow: Ruda i Metally; 2003, 160 p.
22. Gunter M., Vopel K.-H., Janssen W. Untersuchungen zur verwertung von stauben und schlammern aus den abgasreinigungen von hochofen- und blasstahlwerken im drehrohrofen. *Stahl und Eisen*. 1976;96(24):1228-1238.
23. Grudinskij P. I., Korneev V. P., Dyubanov V. G. Carbothermal recovery of electric steel melting dust with extraction of non-ferrous metals and iron. In: *V Mezhdunarodnaya konferenciya-shkola po himicheskoy tekhnologii: tezisy dokladov = The V International school-conference on chemical technology: report abstracts*. 16-20 May 2016, Volgograd. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2016, vol. 2, p. 171-172. (In Russ.).
24. Kozlov P. A., Povysheva E. V., Zolkina A. V., Vorobiev A. G. Modern situation and perspectives of Waelz-process usage for zinc extraction from dust of electric arc furnaces. *Tsvetnye metally*. 2009;7:36-40.
25. Panshin A., Kozlov P. Research and development of complex technology for zinc and indium recovery from oxidized raw material and waste utilization. In: *Lead-Zinc 2010: Proceedings of 49-th Annual Conference of Metallurgists*. 3-6 October 2010, Vancouver. Vancouver; 2010, p. 1255-1261.
26. Naimanbayev M. A., Lokhova N. G., Abisheva A. E., Malydybayev G. K., Barkytova B. N. Effect of some conditions of charge preparation on zinc distillation from oxidized ore. *Complex Use of Mineral Resources*. 2017;1:40-46.
27. Kotenev V. I., Barsukova E. Yu. Briquettes from fine waste of metallurgical and coke-chemical production as an economically profitable replacement of the traditional charge of metallurgical processing. *Metallurg*. 2002;10:42-45. (In Russ.).
28. Babanin V. I., Eremin A. Ya., Bezdezhskij G. N. Development and implementation of a new briquetting technology for fine-fraction materials with liquid glass. Part 1. *Metallurg*. 2007;1:68-71. (In Russ.).
29. Bystrov V. A., Novikov N. I. Innovations as a way to improve the competitiveness of metallurgical enterprises. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Kemerovo State University of Culture and Arts*. 2010;1:47-53. (In Russ.).
30. Letimin V. N., Nasyrov T. M., Makarova I. V. Evaluation of pyrometallurgical dezincing methods of dust and sludge from steel-making shops. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2013;1(13):67-70. (In Russ.).
31. Ivanica S. I., Loginovskiy S. I., Mal'cev V. A., Melamud S. A., Mokrecov A. V., Hramov D. Yu. *Method for electric*

furnace dust disposal. Patent RF, no. 2484153; 2013. (In Russ.).

32. Dyubanov V. G., Zatonskiy A. V., Kozlov P. A., Leont'ev L. I., Pan'shin A. M., Reshetnikov Yu. V. *Processing method of zinc-containing metallurgical waste*. Patent RF, no. 2507280; 2017. (In Russ.).

33. Najmanbaev M. A., Lohova N. G., Baltabekova Zh. A., Barkytova B. N. On processing possibility of zinc-containing dust from the West Siberian Metallurgical Plant and Severstal with the ore from the Shaimerden deposit. In: *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tekhnogennykh obrazovaniy: trudy III Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchenykh V Forum "Ural'skiy rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov"* = *Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations: Proceedings of the III Congress with international participation and the Conference of young scientists of the V Forum 'Ural market of scrap, industrial and municipal waste'*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 178-182. (In Russ.).

34. Kim V. A., Torgovets A. K., Dzhundibaev M. K., Kudarinov S. K., Bogoyavlenskaya O. A., Nurmuhambetov Zh. U. Obtaining low-phosphorus special coke for electrothermal production from non-caking coals of the Shubarkol deposit. In: *Povyshenie tekhnicheskogo urovnya gorno-metallurgicheskikh predpriyatij na osnove innovatsionnykh tekhnologiy: materialy VII Mezhdunarodnoy konferencii = Improving the technical level of mining and metallurgical enterprises based on innovative technologies: materials of the VII International conference*. 2013, Ust'-Kamenogorsk. Ust'-Kamenogorsk; 2013, p. 296-298.

35. Smirnov L. A. Development of a comprehensive scheme for the disposal of iron-containing waste. *Stal'*. 2001;1:89-90. (In Russ.).

36. Ul'yanov V. P., Bulavin V. I., Ul'yanova I. V., Artamonov A. P. Economic evaluation of the technological process of complex processing of dust and sludge of metallurgical redistributions with receipt of prerduced pellets. *Integrovani tekhnologii ta energoberezhennya*. 2013;1:91-96.

37. Kim V. A., Trebuhova T. A., Kim S. V., Bivojno D. G. New carbon reductant carbonizate rexil for iron-containing raw material metallization. *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tekhnogennykh obrazovaniy, V Forum "Ural'skiy rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov"*: trudy Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchenykh = *Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations, the V Forum 'Ural market of scrap, industrial and municipal waste': proceedings of the Congress with international participation and the Conference of Young Scientists*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 212-214. (In Russ.).

38. Panshin A. M., Shakirzyanov R. M., Izbekht P. A., Zatonskiy A. V. Basic ways of improvement of zinc production at JSC Chelyabinsk Zinc Plant. *Tsvetnye Metally*. 2015;5:19-21. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.

39. Panshin A. M., Kozlov P. A., Shakirzyanov R. M., Zatonskiy A. V., Kongoli Flogen F. Development and implementation of a new technology for recycling of metallurgical wastes with the recovery of zinc, lead, tin and iron. In: *Shechtman International Symposium: 2014 Sustainable Industrial Processing*. 2014;4:309-315. <https://doi.org/10.13140/2.1.1602.0800>.

40. Shalimov A. G. Recycling of ferrous metallurgy waste. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom*. 2000;3:53-55. (In Russ.).

41. Demin A. V., Rozhkov A. I., Grudnickij O. M., Nikolaev V. V., Feklistov A. V. Finding ways of recycling dust of arc steel furnaces at the Belarusian metallurgic plant. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2015;3:76-80.

42. Kashirina A. O., Rostovskiy V. I. Disposal of zinc-containing steel-smelting dust and sludge. In: *Ohrana okruzhayushchej sredy i racional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov: V Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya aspirantov i studentov = Environmental protection and rational use of natural resources: the V International scientific conference of postgraduates and students*. 11–13 April 2006, Donetsk. Donetsk: DonNTU; 2006, vol. 1, p. 58-59.

43. Chacrabarti A. K. *Steel making*. New Delhi: PHI Learning Private Limited; 2012, 240 p.

44. Lopukhov G. A. Obtaining dust of better quality in arc furnaces by the companies Krupp and DDS. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom*. 1997;2:59-63. (In Russ.).

45. Rozhkov A. I., Ermakova E. V. Finding ways of recycling dust of arc steel furnaces at the Belarusian metallurgic plant. Part 3. Experiments on briquetting of dust of arc steel furnaces. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*. 2015;(4):93-97. (In Russ.).

46. Vishkarev A. F. Recycling of dust and sludge in converter shops. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom*. 1996;3:70-72. (In Russ.).

47. Godanskij N. A. Experience of using iron-carbon-containing briquettes in steel production. *Metallurg*. 2003;1:43-45. (In Russ.).

48. Odegov S. Yu., Fedosov I. B., Baranov A. P., Chernykh V. E., Patrushov A. E. *Method of metallurgical production waste processing*. Patent RF, no. 21; 2017. (In Russ.).

49. Yakornov S. A., Pan'shin A. M., Kozlov P. A., Ivakin D. A. Current state of electric arc furnace dust processing in Russia and abroad. In: *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tekhnogennykh obrazovaniy, V Forum "Ural'skiy rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov"*: trudy III Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchenykh = *Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations, the V Forum 'Ural market for scrap, industrial and municipal waste': proceedings of the III Congress with international participation and the Conference of Young Scientists*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 64-69. (In Russ.).

50. Kikuchi S., Ito S., Kobayashi I., Tsuge O., Tokuda K.

- ITmk3® process. *Kobelco technology review*. 2010;29:77-84.
51. Kobayashi I., Tanigaki Y., Liagami A. A new process to produce iron directly from fine ore and coal. *Iron and Steelmaker*. 2001;9:19-22.
52. Dubrovsky V. A., Starikov A. I., Panishev N. V., Redin E. V., Knyazev E. V. Direct reduction of TI-V magnetite via ITmk3 technology. In: *4th International symposium on high-temperature metallurgical processing*. 3–7 March 2013, San Antonio. San Antonio; 2013, p. 45-48.
53. Dubrovskij B. A., Shilyaev P. V., Redin E. V. Metallization of spar iron ore from the Bakalskoye deposit with the production of granular cast iron. In: *Energoberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Ekologiya: sbornik trudov VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu MMK = Energy saving technologies in industry. Furnace units. Ecology: Collected works of the VI International scientific and practical Conference dedicated to the 80th anniversary of Magnitogorsk Iron and Steel Works*. 15–20 October 2012, Moscow. Moscow: 2012, p. 178-182. (In Russ.).
54. Yunes R., Opryshko I. A., Loboda P. I. Analysis of technologies for metal oxide direct reduction using rotary hearth furnaces. *Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy 'Kievskij politekhnicheskij institut'*. 2011;61:184-192.
55. Gordon Y., Els J. ITmk3 technology and its application for mining and steel industry in Ukraine and Russia. In: *International Conference on Ironmaking Technology*. 21 March 2007, Kyiv. Kyiv; 2007, p. 128-131.
56. Tanaka H., Miyagawa K., Harada T. FASTMET, FASTMELT and ITmk3: development of new coal-based ironmaking processes. *RHF Technologies*. 2011;5:15-19.
57. Panishev N. V., Bigeev V. A., Chernyaev A. A. Fine-grained metallurgical wastes recycling for iron pellets production and zinc extraction. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova = Vestnik of Magnitogorsk State Technical University*. 2013;4:26-29.
58. Clelland J. M., Metius G. E. Recycling ferrous and nonferrous waste streams with fastmet. *Journal of the minerals, metals and materials Society*. 2003;8:30-34.
59. Tsutsumi H., Yoshida S., Tetsumoto M. Features of FASTMET® Process. *Kobelco technology review*. 2010;29:85-92.
60. Baranov A. P., Fedosov I. B., Tlekhugov N. V. Industrial recycling prospects of zinc-containing dust from electrometallurgical production in Russia. *Metallurgiya-Intekhko-2014: sbornik dokladov i katalog uchastnikov VII Mezhdunarodnoj konferencii = Metallurgy-Intekhko-2014: collected reports and the catalog of participants of the VII International conference*. 25–26 March 2014, Moscow. Moscow: Intekhko LLC; 2014, p. 71-76. (In Russ.).
61. Baranov A. P. Environmental problems when processing zinc-containing dust of arc steel-making furnaces. *Ferrous Metallurgy. Chernaya metallurgiya. Bulletin' nauchno-tehnicheskoy informacii = Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2012;7:91-95. (In Russ.).
62. Daiga V. R., Home D. A. Production of crude zinc oxide from steel mill waste oxides using a rotary health furnace. In: Stewart D. L., Daley J. C., Stephens R. L. (eds.). *Recycling of Metals and Engineered Materials*. Warrendale: TMS; 2000, p. 361-368. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch31>.
63. Money K. L., Hanewald R. H., Bleakney R. R. Processing steel wastes pyrometallurgically at Inmetco. In: Stewart D. L., Daley J. C., Stephens R. L. (eds.). *Recycling of Metals and Engineered Materials*. Warrendale: TMS; 2013, p. 28-35. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch34>.
64. Pargeter J. K., Hanewald R. H., Dombrowski D. E. Operating experience at INMETCO and application of the process to the production of DRI. *Conservation & Recycling*. 1985;8(13):363-375. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(85\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0361-3658(85)90006-2).
65. Borlée J., Steyls D., Colin R., Munnix R., Economopoulos M. Comet: un procédé utilisant du charbon pour produire une éponge de fer de qualité à partir de minerai fin. *Revue de Métallurgie*. 1999;96(3):331-340. <https://doi.org/10.1051/metal/199996030331>.
66. Chatterjee A, Banshidhar P. *Metallurgy for steelmaking: production and use*. New Delhi: Allied Publishers LTD; 2001, 732 p.
67. Kovalev V. N. Technology of complex processing of zinc-containing dust and sludge with resulting metallic rough zinc and iron. *Stal'*. 2013;2:72-76. (In Russ.).
68. Kologriev K. A. Dezincification of sludge and dust during agglomeration under pressure. In: *Mezhdunarodnyj simpozium, posvyashchennyy probleme kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva = International symposium dedicated to the problem of complex processing of industrial waste from metallurgical production*. 8 October 2009, Moscow. Moscow: Central Research Institute of Ferrous Metallurgy named after I.P. Bardin; 2009, p. 49-52. (In Russ.).
69. Schoukens A. F., Denton G. M., Jones R. T. Pilot-plant production of Prime Western grade zinc from lead blast-furnace slag using the Enviroplas process. In: *Recycling of Metals and Engineered Materials, Third International Symposium: Third International Symposium*. November 1995, Point Clear, Alabama. Point Clear, Alabama; 1995, p. 857-868.
70. Leont'ev V. G. High-intensity processing of zinc-containing man-made waste by melting in a self-foaming oxide bath. *Mezhdunarodnyj simpozium, posvyashchennyy probleme kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva = International symposium dedicated to the problem of complex processing of industrial waste from metallurgical production*. 8 October 2009, Moscow. Moscow: Central Research Institute of Ferrous Metallurgy named after I.P. Bardin; 2009, p. 62-65.
71. Mel'nichenko I. A., Kurenkov D. S., Lipina A. V. Zinc leaching from the dust of steel production sludge dumps of mining and metallurgical complex enterprises with subsequent electrolysis. *Sovremennye tekhnologii v oblasti proizvodstva i obrabotki cvetnyh metallov: materialy XII Nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern technologies*

in the field of production and processing of non-ferrous metals: materials of the XII scientific and practical conference. 12 November 2015, Moscow. Moscow: VNIIMET-MASh; 2016, p. 372-378. (In Russ.).

72. Tarasov A. V., Besser A. D., Mal'cev V. I. *Metallurgical processing of secondary zinc raw materials*. Moscow: Gincvetmet; 2004, 219 p. (In Russ.).

73. Johansson L.-G. CONTOP now at MEFOS. *Newsletter from MEFOS – the foundation for metallurgical research*. 2010;1:2-5.

74. Both I., Houbart M., Roth J.-L. Advanced technologies for residue treatment – successful start-up of the PRIMUS® plant of Dragon Steel in Taiwan. In: *Iron & Steel technology conference: British Library Conference Proceedings*. 2010, Pittsburgh. Pittsburgh; 2010, p. 209-216.

75. Loshkarev A. N., Matyunina E. V. Implementation of the PRIMUS process in DSP-80 of the JSC Metallurgical plant named after A.K. Serov. In: *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauche i proizvodstve: sbornik dokladov IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonih «Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauche i proizvodstve» (TIM'2015) s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchyonnoy 95-letiyu osnovaniya kafedry i universiteta = Heat engineering and informatics in education, science and production: collected reports of the IV All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists 'Heat engineering and informatics in education, science and production' (TIM'2015) with international participation dedicated to the 95th anniversary of the foundation of the department and the university*. 26–27 March 2015, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2015, p. 93-95. (In Russ.).

76. Bratina J. E., Lenti K. M. PIZO furnace demonstration operation for processing EAF dust. *Iron & Steel Technology*. 2007; 4:118-122.

77. Holtzer M., Kmita A., Roczniak A. The recycling of materials containing iron and zinc in the oxycup process. *Archives of Foundry Engineering*. 2015;15(1):126-130.

78. Fleischanderl A., Gennari U., Ilie A. ZEWA – metallurgical process for treatment of residues from steel industry and other industrial sectors to generate valuable products. *Ironmaking & Steelmaking*. 2004;6:444-449. <https://doi.org/10.1179/irs.2004.31.6.444>.

79. Schoukens A. F. S., Nelson L. R., Barcza N. A. Plasma-arc treatment of steel-plant dust and zinc-containing slag – theoretical and practical considerations. In: *Recycling of lead and zinc the Challenge of the 1990s: Proceedings of the International Conference*. 11–13 June 1991, Rome. Rome; 1991, p. 361-370.

80. Arhipova L. V., Fedorov A. N. Zinc leaching from steel-making production dust using NaOH. In: Rahutin M. G., Voznesenskij A. S., Didenko S. I., Kuznecov D. V., Petrovskij P. V., Alpatov A. V. (eds.). *70-e Dni Nauki studentov NITU «MISiS» = 70th Days of Science of NUST MISiS students: collection of articles*. Moscow: Moscow Institute of Steel and Alloys; 2015, p. 93-95. (In Russ.).

81. Barcza N. A., Robertson D. G. C., Schoukens A. F. S., Shaw F., Denton G. M., Worcester T. W., Bailey D. J. En-

viroplas technology for the recovery of lead and zinc from lead blast-furnace slags. In: *Recycling Lead and Zinc into the 21st Century: Proceedings of the 6th International Conference*. 18–23 June 1995, Madrid. Madrid: International Lead and Zinc Study Group; 1995, p. 296-312.

82. Seregin P. S., Popov V. A., Tsemekhman L. Sh. New methods of processing of materials containing zinc, tin and lead. *Tsvetnye metally*. 2010;10:27-33. (In Russ.).

83. Blinkova E. V., Eliseev E. I. Kinetics of zinc oxide dissolution in aqueous solutions of acetic acid. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2005;5:8-10. (In Russ.).

84. Havlik T., Souza B. V., Bernardes A. M., Schneider I. A. H., Mišková A. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;135(1-3):311-318.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>.

85. Havlik T., Turzakova M., Stopić S., Friedrich B. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydrometallurgy*. 2005;77(1):41-50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>.

86. Yoshida T. Leaching of zinc oxide in acidic solution. *Materials Transactions*. 2003;44(12):2489-2493. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.2489>.

87. Özverdi A., Erdem M. Environmental risk assessment and stabilization/solidification of zinc extraction residue: I. Environmental risk assessment. *Hydrometallurgy*. 2010;100(3-4):103-109.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.011>.

88. Ye Guozhu, White J. F., Wei L. Y. Association of halogens in electric arc furnace dust and zinc oxide fume before and after leaching. In: *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology (REWAS 1999): Proceedings Extraction and Process Metallurgy Meeting*. 5–9 September 1999, San Sebastián. San Sebastián; 1999, p. 1503-1510.

89. Cruells M., Roca A., Núnéz C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid. *Hydrometallurgy*. 1992;31(3):213-231.

[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K).

90. Yan Huan, Chai Li-yuan, Peng Bing, Li Mi, Peng Ning, Hou Dong-ke. A novel method to recover zinc and iron from zinc leaching residue. *Minerals Engineering*. 2014;55:103-110.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.015>.

91. Oustadakis P., Tsakiridis P. E., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): part I: characterization and leaching by diluted sulphuric acid. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;179(1-3):1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.059>.

92. Langová Š., Rípková J., Vallová S. Atmospheric leaching of steel-making wastes and the precipitation of goethite from the ferric sulphate solution. *Hydrometallurgy*. 2007;87(3-4):157-162.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.002>.

93. Tsakiridis P. E., Oustadakis P., Katsiapi A., Agatzini-Leonardou S. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: downstream processing and zinc recovery by electrowinning.

- Journal of Hazardous Materials*. 2010;179(1-3):8-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.004>.
94. Langová Š., Matýsek D. Zinc recovery from steel-making wastes by acid pressure leaching and hematite precipitation. *Hydrometallurgy*. 2010;101(3-4):171-173. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.003>.
95. Xanthopoulos P., Agatzini-Leonardou S., Oustadakis P., Tsakiridis P. E. Zinc recovery from purified electric arc furnace dust leach liquors by chemical precipitation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017;5(4):3550-3559. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.023>.
96. Rao S. R. *Resource recovery and recycling from metallurgical wastes*. Montreal: Elsevier Science; 2006, 580 p.
97. Van Weert G., Peek E. M. L. Reagent recovery in chloride hydrometallurgy – some missing links. *Hydrometallurgy*. 1992;29(1-3):513-526. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90030-4).
98. Langová Š., Leško J., Matýsek D. Selective leaching of zinc from zinc ferrite with hydrochloric acid. *Hydrometallurgy*. 2009;95(3-4):179-182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.040>.
99. Jerzy G., Ostrowska P. Leaching of EAF dust with acidic solutions. In: *Ars Separatoria Acta 2005: Proceedings of the XXth International Symposium on Physico-Chemical Methods of the Mixtures Separation*. 20–23 June 2003, Szklarska. Szklarska Poręba; 2005.
100. Katrenov B. B., Zhumashev K. Zh., Narembekova A. K., Musina A. E. Determination of optimal dezincification parameters for hydrochloric acid solution converter sludge. *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tekhnogennykh obrazovaniy, V Forum «Ural'skij rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov»: trudy Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchenykh = Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations of the V Forum 'Ural market of scrap, industrial and municipal waste': proceedings of the Congress with international participation and the Conference of young scientists*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 174-177. (In Russ.).
101. Drinkard Jr. W. F., Woerner H. J. *Separation of calcium from metal compounds*. Patent US, no. 5.980.842; 1997.
102. Vazarlis H. G. Hydrochloric acid-hydrogen peroxide leaching and metal recovery from a Greek zinc-lead bulk sulphide concentrate. *Hydrometallurgy*. 1987;19(2):243-251. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0304-386X(87)90008-9).
103. Barrett E. C., Nenniger E. H., Dziwinski J. A hydro-metallurgical process to treat carbon steel electric arc furnace dust. *Hydrometallurgy*. 1992;30(1-3):59-68. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90077-D](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90077-D).
104. Leclerc N., Meux E., Lecuire J. M. Hydrometallurgical recovery of zinc and lead from electric arc furnace dust using mononitritoltriacetate anion and hexahydrated ferric chloride. *Journal of Hazardous Materials*. 2002;91(1-3):257-270. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00394-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00394-6).
105. Youcai Zhao, Stanforth R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Journal of Hazardous Materials*. 2001;80(1-3):223-240. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00305-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00305-8).
106. Li Qiang, Zhao Youcai, Jiang Jiachao, Zhang Chenglong. Optimized hydrometallurgical route to produce ultrafine zinc powder from industrial wastes in alkaline medium. *Procedia Environmental Sciences*. 2012;16:674-682. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.093>.
107. Farnasov G. A., Kovalev V. I., Kurunov I. F., Bizhanov A. M., Vershinin I. N. *Selective extraction method of iron oxide and zinc oxide from sludge and dust of gas cleaning of metallurgical units*. Patent RF, no. 2617086; 2017. (In Russ.).
108. Dutra A. J. B., Paiva P. R. P., Tavares L. M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Minerals Engineering*. 2006;19(5):478-485.
109. Larba R., Boukerche I., Alane N., Habbache N., Djerad S., Tifouti L. Citric acid as an alternative lixiviant for zinc oxide dissolution. *Hydrometallurgy*. 2013;134-135:117-123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.002>.
110. Bigeev V. A., Sergeev D. S., Kolesnikov Yu. A. Application possibilities of fine, iron-containing metallurgical wastes. *Litejnye processy*. 2014;13:35-39. (In Russ.).
111. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Hydrometallurgy*. 2005;78(3-4):236-245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>.
112. Zhang Duchao, Zhang Xinwang, Yang Tianzu, Rao Shuai, Hu Wei, Liu Weifeng, et al. Selective leaching of zinc from blast furnace dust with mono-ligand and mixed-ligand complex leaching systems. *Hydrometallurgy*. 2017;169:219-228. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.003>.
113. Halli P., Hamuyuni J., Leikola M., Lundström M. Developing a sustainable solution for recycling electric arc furnace dust via organic acid leaching. *Minerals Engineering*. 2018;124:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.011>.
114. Fidarov B. F., Petrov G. V. Ferrite-containing technogenic waste of metallurgical production. In: *Nedelya nauki SPbPU: materialy Nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem Instituta metallurgii, mashinostroeniya i transporta = A Week of Science at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University: materials of the Scientific conference with international participation of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport*. 14–19 November 2016, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Polytechnic University; 2016, p. 125-128. (In Russ.).
115. Tang Mo-tang, Zhang Peng, He Jing, Yuan Xia, Chen Yong-ming. Leaching zinc dust in system of Zn(II)-(NH₄)₂SO₄-H₂O. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2007;38(5):867-872.
116. Wang Hui-gang, Jia Nannan, Liu Wenwu, Zhang Mei, Guo Min. Efficient and selective hydrothermal extraction of zinc from zinc-containing electric arc furnace dust using a novel bifunctional agent. *Hydrometallurgy*. 2016;16:107-112. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.013>.

117. Chen Dong, Sharma S. K., Mudhoo A. *Handbook on applications of ultrasound: sonochemistry for sustainability*. New York: CRC Press; 2012, 744 p.
118. Popov A. A., Petrov G. V. Disposal of steel industry zinc-containing dust. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;4:177-185. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-4-177-185>.
119. Steer J. M., Griffiths A. J. Investigation of carboxylic acids and non-aqueous solvents for the selective leaching of zinc from blast furnace dust slurry. *Hydrometallurgy*. 2013;140:34-41. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.08.011>.
120. Dutrizac J. E. Zinc and lead processing. In: *37th Annual Conference of Metallurgists of CIM: Proceedings of an International Symposium*. 16–19 August 1998, Calgary. Calgary: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 1998, p. 886.
121. Diaz G., Martin D. Modified Zincex process: the clean, safe and profitable solution to the zinc secondaries treatment. *Resources, Conservation and Recycling*. 1994;10(1-2):43-57. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90037-X).
122. Wu Min, Nakano M., She Jin-Hua. A model-based expert control system for the leaching process in zinc hydrometallurgy. *Expert Systems with Applications*. 1999;16(2):135-143. [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(98\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(98)00062-1).
123. Kusik C. L., Meissner H. P. Calculating activity coefficients in hydrometallurgy – a review. *International Journal of Mineral Processing*. 1975;2(2):105-115. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(75\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0301-7516(75)90015-0).
124. Halli P., Hamuyuni J., Revitzer H., Lundström M. Selection of leaching media for metal dissolution from electric arc furnace dust. *Journal of Cleaner Production*. 2017;164:265-276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.212>.
125. Nyirenda R. L. The processing of steelmaking flue-dust: a review. *Minerals Engineering*. 1991;4(7-11):1003-1025. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90080-F](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90080-F).
126. Niubó M., Fernández A. I., Chimenos J. M., Haurie L. A possible recycling method for high grade steels EAFD in polymer composites. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;171(1-3):1139-1144. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.126>.
127. Barreneche C., Fernández A. I., Niubó M., Chimenos J. M., Espiell F., Segarra M. et al. Development and characterization of new shape-stabilized phase change material (PCM) – polymer including electrical arc furnace dust (EAFD), for acoustic and thermal comfort in buildings. *Energy and Buildings*. 2013;61:210-214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.026>.
128. Nazari A., Shafyei A., Saidi A. Recycling of electric arc furnace dust into glass ceramic. *Materials Chemistry and Physics*. 2017;205:436-441. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.045>.
129. Cholake S. T., Farzana R., Numata T., Sahajwalla V. Transforming electric arc furnace waste into value added building products. *Journal of Cleaner Production*. 2018;171:1128-1139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.084>.
130. Vargas A. S., Masuero A. B., Vilela A. C. F. Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes. *Cement and Concrete Research*. 2006;36(10):1833-1841. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.003>.
131. Machado A. T., Valenzuela-Diaz F. R., Souza C. A. C., Andrade Lima L. R. P. Structural ceramics made with clay and steel dust pollutants. *Applied Clay Science*. 2011;51(4):503-506. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.004>.
132. Ledesma E. F., Lozano-Lunar A., Ayuso J., Galvín A. P., Fernández J. M., Jiménez J. R. The role of pH on leaching of heavy metals and chlorides from electric arc furnace dust in cement-based mortars. *Construction and Building Materials*. 2018;183:365-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.175>.
133. Silva Magalhães M., Faleschini F., Pellegrino C., Brunelli K. Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars. *Construction and Building Materials*. 2017;157:141-150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.074>.
134. Khatlab R. M., El-Sayed Seleman M. M., Zawrah M. F. Assessment of electric arc furnace dust: powder characterization and its sinterability as ceramic product. *Ceramics International*. 2017;43(15):12939-12947. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.192>.
135. Artyomov A. V., Ruzhickij A. O. Obtaining and using of dispersed magnetic metals as catalysts for liquid-phase oxidation processes. Available from: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/004.htm>. [Accessed 15th May 2021]. (In Russ.).
136. Sverguzova S. V., Lashina O. D. Use of dust from electric arc steel-making furnaces for waste water cleaning from nickel and copper ions. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2008;4:46-47. (In Russ.).
137. Sverguzova S. V., Porozhnyuk L. A., Ipanov D. Yu., Shamshurov A. V., Novikova E. V. Colloidal-chemical properties of electric arc furnace dust in water treatment processes. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2013;7:22-25. (In Russ.).
138. Kukurugya F., Vindt T., Havlik T. Behavior of zinc, iron and calcium from electric arc furnace (EAF) dust in hydrometallurgical processing in sulfuric acid solutions: thermodynamic and kinetic aspects. *Hydrometallurgy*. 2015;154:20-32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.008>.
139. Vereš J., Jakabský Š., Lovas M. Zinc recovery from iron and steel making wastes by conventional and microwave assisted leaching. *Acta Montanistica Slovaca*. 2011;16(3):185-191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Топоркова Юлия Игоревна,
аспирант,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия

Блудова Дана,
аспирант,
ассистент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия

Мамяченков Сергей Владимирович,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник,
заведующий кафедрой металлургии цветных
металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия

Анисимова Ольга Сергеевна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 04.09.2021; одобрена после рецензирования 11.10.2021; принята к публикации 27.10.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia I. Toporkova,
Postgraduate student,
Ural Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

Dana Bludova,
Postgraduate Student,
Assistant Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

Sergey V. Mamyachenkov,
Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Head of the Department of Nonferrous Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

Olga S. Anisimova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

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 04.09.2021; approved after reviewing 11.10.2021; accepted for publication 27.10.2021.

ПЕРСОНАЛИИ

Профессор Анатолий Иванович Орлов: ученый-металлург, педагог, организатор высшей школы

Профессору Орлову Анатолию Ивановичу, выдающемуся ученому-металлургу, основателю кафедры автоматизации производственных процессов, одному из первых получивших это почетное звание в Иркутском политехническом институте, ныне Иркутском национальном исследовательском техническом университете, исполнилось бы в этом году 100 лет.

PERSONALITIES

Professor Orlov Anatoliy Ivanovich: metallurgist scientist, teacher, higher school organizer

This year we celebrate the 100th birth anniversary of Professor Anatoly Ivanovich Orlov, an outstanding metallurgist scientist, the founder of the Department of Automation of Production Processes, one of the first to receive this honorary title at Irkutsk Polytechnic Institute, now Irkutsk National Research Technical University.



В сентябре 2021 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Анатолия Ивановича Орлова – выдающего ученого-металлурга, основателя кафедры автоматизации производственных процессов в нашем университете (тогда ИПИ), любимого преподавателя 13 выпусков студентов этой кафедры, участника Великой Отечественной войны, патриота политеха, активного и жизнерадостного человека, подготовившего пять кандидатов технических наук.

Научный потенциал и организаторский талант, умение увлечь студентов и преподавателей были огромными. Сколько еще можно было бы сделать, организовать, достичь в

рамках кафедры, факультета и всего института (в должности проректора по научной работе), если бы ни трагическая авиакатастрофа, которая оборвала жизнь 54-летнего А. И. Орлова.

Орлов Анатолий Иванович родился 15 сентября 1921 г. в семье учителей Ивана Михайловича и Агриппины Георгиевны Орловых. Отец многие годы проработал директором средней школы № 26 г. Иркутска. В 1938 г. А. И. Орлов, после окончания с отличием средней школы, поступил на первый курс геологического факультета ИГУ. Но учебу прервала война. С первых дней Великой Отечественной войны был призван на фронт, участвовал в обороне Москвы. Дважды был тяжело ранен. В 1942 г. демобилизован по инвалидности и в этом же году восстановлен на 3-й курс Иркутского горно-металлургического института, который, несмотря на ранения и контузию, в 1947 г. окончил с отличием с присвоением квалификации инженера-металлурга со специализацией по металлургии цветных и благородных металлов и был оставлен для работы на кафедре.

В 1950 г. поступил и в 1952 г. досрочно окончил целевую аспирантуру Московского института цветных металлов и золота им. М. И. Калинина, защитив под руководством профессора В. В. Ванюкова кандидатскую диссертацию по теме: «Роль ферритов в

процессе удаления никеля при огневом рафинировании меди».

В 1962 г., по поручению ректората, с группой преподавателей кафедры МЦМ открыл кафедру автоматизации производственных процессов института. Четырнадцать лет развивал кафедру и руководил работой коллектива.

В 1970 г. А. И. Орлов защитил докторскую диссертацию по актуальной тематике «Интенсификация процесса выщелачивания: на примере гидрометаллургии меди». Был деканом металлургического факультета, членом совета факультета и института, членом диссертационного совета, членом парткома и профкома. Под его руководством подготовлено и защищено 5 кандидатских диссертаций преподавателями кафедры (А. В. Баев, В. Г. Вихорев, С. И. Половнева, В. М. Салов, В. Д. Парисин). А. И. Орлов внес большой

научный вклад в теорию гидрометаллургических процессов, технологию получения меди из руд Удоканского месторождения. Обладал прекрасными организаторскими способностями, был очень энергичным, целеустремленным человеком. Трагически погиб в возрасте 54 лет в феврале 1976 г. от последствий авиационной катастрофы в г. Иркутске, вылетая в Москву для утверждения на должность проректора по научной работе ИПИ.

В настоящее время кафедру возглавляет ученик профессора А. И. Орлова, д-р техн. наук, профессор В. В. Ёлшин, сохранивший стиль руководства своего учителя и лучшие традиции кафедры. Кафедра, переименованная в кафедру «Автоматизации и управления», развивается, пополняется молодыми преподавателями, которым необходимо знать и помнить основателей.



Первые преподаватели, аспиранты и УВП кафедры автоматизации производственных процессов, 1966 г.
Сидят слева направо: доцент Ю. Д. Матышкин, доцент И. С. Сименас, доцент А. В. Виноградова, заведующий
кафедрой профессор А. И. Орлов, доцент В. И. Назаров, ст. преподаватель В. В. Ямщиков, ст. преподаватель
Е. А. Копытов, аспирант А. Д. Жириков. Стоят: лаборанты В. А. Москвитин, В. Я. Бурков, Г. А. Куницын,
П. Н. Биють, ст. преподаватель Т. В. Баева, аспирант А. В. Баев, ст. преподаватели Н. А. Каримов и В. А. Кокоуров
The first teachers, postgraduate students and education support staff of the Department of Automation of Production
Processes, 1966. Sitting from left to right: Associate Professor Y. D. Matyskin, Associate Professor I. S. Simenas, Associate
Professor A.V. Vinogradova, Head of the Department Professor A. I. Orlov, Associate Professor V. I. Nazarov, Senior Lecturer
V. V. Yamshchikov, Senior Lecturer E. A. Kopytov, Postgraduate Student A. D. Zhirikov. Standing: Laboratory Assistants
V. A. Moskvitin, V. Ya. Burkov, G. A. Kunitsyn, P. N. Biyut, Senior Lecturer T. V. Baeva, Postgraduate Student A.V. Baev,
Senior Lecturers N. A. Karimov and V. A. Kokourov

Почетные звания и награды профессора А. И. Орлова*:

Орден «Знак Почета», медали «За оборону Москвы», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «XX лет Победы», «XXX лет Победы»,

«За трудовую доблесть», «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина».

В ИРНИТУ, в корпусе «Е», установлена мемориальная доска у кабинета, где работал А. И. Орлов.

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (вся информация предоставляется одним файлом).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Кибер-Ленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

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

iPolytech Journal

Том 25, № 5. 2021/Vol 25, № 5. 2021

16+



Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор
В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 31.10.2021 г.
Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 20.
Тираж 500 экз. Заказ 176. Поз. плана 3н.

Издание распространяется **бесплатно**

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

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО “Иркутский национальный
исследовательский технический
университет”

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А