

Том 23 № 2
2019

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

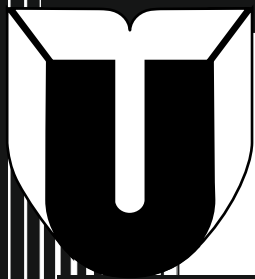
ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019



Том 23 № 2

2019

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 23 № 2

2019

Редакционная коллегия

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания –

6 раз в год

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

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

Учредитель Иркутский национальный
исследовательский технический
университет

Подписной индекс в Каталоге
русской прессы – 38237

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

Адрес редакции:
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
ауд. Д-215, e-mail: pgg@istu.edu

КОРНЯКОВ М.В., доктор технических наук, ректор Иркутского национального
исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)

НЕМЧИНОВА Н.В., доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой
металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского
технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)

БАЖИН В.Ю., доктор технических наук, декан факультета переработки минерального сырья
Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

БАЛИКОВ С.В., доктор технических наук, главный научный сотрудник Иркутского научно-
исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов (г. Иркутск,
Россия)

БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю., доктор технических наук, профессор Кузбасского государственного
технического университета (г. Кемерово, Россия)

БОЛДЫРЕВ А.И., доктор технических наук, профессор кафедры технологии
машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж,
Россия)

БОРОВИКОВ Ю.С., доктор технических наук, и.о. ректора Новгородского государственного
университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)

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

ГАЛЕВСКИЙ Г.В., доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургии цветных
металлов и химической технологии Сибирского государственного индустриального
университета (г. Новокузнецк, Россия)

ДАМБИЕВ Ц.Ц., доктор технических наук, профессор Восточно-Сибирского
государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ, Россия)

ЗАЙДЕС С.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального
исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

ЗАКАРЮКИН В.П., доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики
транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)

КАРПЕНКО Е.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лабораторий
плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического
материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)

КЛЕР А.М., доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

КОЛОСОК И.Н., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

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

КУРБАЦКИЙ В.Г., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

МАМАЧЕНКОВ С.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

МАТЛИН М.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой деталей машин
и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического
университета (г. Волгоград, Россия)

НОВИЦКИЙ Н.Н., доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

ОГАР П.М., доктор технических наук, профессор Братского государственного университета
(г. Братск, Россия)

ПАЗДЕРИН А.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
автоматизированных электрических систем Уральского Федерального университета имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

ПАНТЕЛЕЕВ В.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск,
Россия)

РАХИМЯНОВ Х.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии
машиностроения Новосибирского государственного технического университета
(г. Новосибирск, Россия)

СЕНДЕРОВ С.М., доктор технических наук, заместитель директора Института систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

СТЕННИКОВ В.А., доктор технических наук, профессор, директор Института систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

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

ТАНУТРОВ И.Н., доктор технических наук, главный научный сотрудник Института
металлургии УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

ТЮРИНА Э.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

ФЕДЯЕВ А.А., доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной
теплоэнергетики Братского государственного университета (г. Братск, Россия)

ФИШОВ А.Г., доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного
технического университета (г. Новосибирск, Россия)

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

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 2

2019

Editorial board

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

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

Subscription index in the Catalog
of the Russian Press – 38237

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

Address of the editorial office:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074,
D-215, e-mail: pgp@istu.edu

KORNYAKOV M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
NEMCHINOVAN V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
BAZHIN V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)
BALIKOV S.V., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of Irkutsk Scientific Research Institute of Noble and Rare Metals and Diamonds (Irkutsk, Russia)
BLUMENSTEIN V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Professor of Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)
BOLDYREV A.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)
BOROVIKOV Yu.S., Dr. Sci. (Eng.), Acting Rector of Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)
VOROPAI N.I., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
GALEVSKIY G.V., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Nonferrous Metallurgy and Chemical Technology of the Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)
DAMBIEV Ts.TS., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the East Siberian State University of Technology and Management (Ulan-Ude, Russia)
ZAYDES S.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
ZAKARYUKIN V.P., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Transport Electricity of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
KARPENKO E.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies of the Institute of Physical Materials Science of the SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
KLER A.M., Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
KOLOSKO I.N., Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
KRUYKOV A.V., Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Professor of the Department of Transport Electric Power Industry of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
KURBATSKIY V.G., Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
MAMYACHENKOV S.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
MATLIN M.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
NOVITSKIY N.N., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
OGAR P.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor of Bratsk State University (Bratsk, Russia)
PAZDERIN A.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
PANTELEEV V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Complexes and Systems of the Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
RAKHIMYANOV Kh.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)
SENDEROV S.M., Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
STENNIKOV V.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
STYCZYNSKI S.A., Professor of the Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)
TANUTROV I.N., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)
TYURINAE A., Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
FEDYAEV A.A., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering of Bratsk State University (Bratsk, Russia)
FISHOV A.G., Dr. Sci. (Eng.), Professor Новосибирского государственного технического университета (Novosibirsk, Russia)
SCHOLTES B., Director of the Institute of Metal Science of the University of Kassel (Kassel, Germany)

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	201
------------------	-----



Машиностроение и машиноведение

Аистов И.П., Вансович К.А., Бусаров С.С., Титов Д.С., Недовенчаный А.В. Анализ нагруженного состояния цилиндра ступени тихоходного поршневого агрегата при сжатии жидкостей и газов	205
Брянских Т.Б., Нижегородов А.И. Разработка типоразмерного ряда одиночных модулей для печей обжига с механической подовой платформой	214
Вьонг Куанг Чык, Ковригина И.В., Елисеев С.В., Кибирев Ю.В. Технологические вибрационные машины – новые подходы в оценке и корректировке динамических состояний. Часть II	225
Зедгенизов В.Г., Стрельников А.Н., Бирюков Д.С. Математическая модель регулятора аксиально-поршневого насоса на примере HPV102GW-RH23A фирмы «Hitachi»	237
Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С., Серебренникова А.Г. Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента за счет нанесения покрытий	246
Осипов А.Г. Модернизация лопастных двигателей внутреннего сгорания	252
Павлов В.Е. Исследование режимов работы длинноходового электромагнитного молота методом компьютерного моделирования	260
Пимштейн П.Г., Еловенко Д.А. Математическое обоснование эффективности бесшовного кольцевого соединения несущих элементов многослойных цилиндрических корпусов для сосудов давления и реакторов	271
Платонов В.В., Майзель И.Г. Модернизация металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением	285



Энергетика

Булатов Ю.Н. Метод пассивной идентификации математической модели установки распределенной генерации	296
Лукичева И.А., Куликов А.Л. Повышение точности оценки состояния электрической сети в условиях кибератак с использованием медианной фильтрации	310
Панкратьев П.С. Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением в условиях многокритериальности с учетом неточно выраженных предпочтений лиц, принимающих решение	320
Соколов А.Д., Муzychuk С.Ю., Абдулина Е.Р. Ключевые проблемы перевода дизельных электростанций на альтернативные виды топлива	335
Томилов В.С., Баринев И.А., Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О. Совершенствование силовой цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения	346



Металлургия и материаловедение

Горланов Е.С. Особенности применения твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов	356
Мамяченков С.В., Якорнов С.А., Анисимова О.С., Блудова Д.И. Обзор результатов исследований электролитического получения цинковых порошков из щелочных растворов	367
Рис А.Д., Сундуров А.В., Дубовиков О.А. Поведение бокситовых концентратов на стадии выщелачивания по способу Байера	395
Саламатов О.В., Саламатов В.И. О влиянии флокулянтов на кинетику процессов обезвоживания и промывки красных шламов из низкокремнистых бокситов при производстве глинозема	404
Яковлева А.А., Немчинова Н.В. Перспективы использования глин локального проявления в металлургической практике	415

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 2

2019

CONTENTS

Contents.....	202
---------------	-----

Mechanical Engineering and Machine Science

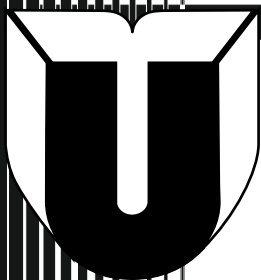
✎ Aistov I.P., Vansovich K.A., Busarov S.S., Titov D.S., Nedovenchaniy A.V. Analysis of the loaded state of the cylinder of the low-speed piston unit stage under liquid and gas compression.....	205
✎ Bryanskykh T.B., Nizhegorodov A.I. Development of a dimension range of single modules for firing furnaces with a mechanical hearth platform.....	214
✎ Vuong Quang Truc, Kovrigina I.V., Eliseev S.V., Kibirev Yu.V. Technological vibrating machines – new approaches in dynamic state assessment and correction. Part II.	225
✎ Zedgenizov V.G., Strelnikov A.N., Biryukov D.S. A mathematical model of the axial piston pump controller on example of Hitachi HPV102GW-RH23A.....	237
✎ Mokritskiy B.Ya., Sitamov E.S., Serebrennikova A.G. Improving carbide cutting tool performance through coating.....	246
✎ Osipov A.G. Vane internal combustion engine upgrade.....	252
✎ Pavlov V.E. Study of long-stroke electromagnetic hammer operation modes by computer simulation.....	260
✎ Pimshtein P.G., Elovenco D.A. Mathematical justification of seamless ring joint efficiency of multilayer cylindrical shell bearing elements for pressure vessels and reactors.....	271
✎ Platonov V.V., Maizel I.G. Modernization of metalworking CNC machine-tools.....	285

Power Engineering

✎ Bulatov Yu.N. Passive identification method of distributed generation plant mathematical model.....	296
✎ Lukicheva I.A., Kulikov A.L. Improving electrical grid state estimation accuracy under cyber-attacks using median filtering.....	310
✎ Pankratiev P.S. Thermal power plant location in the region with decentralized power supply under multi-attribute conditions considering imprecisely expressed preferences of decision makers.....	320
✎ Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Abdulina E.R. Major problems of diesel power plant switch to alternative types of fuel.....	335
✎ Tomilov V.S., Barinov I.A., Melnichenko O.V., Shramko S.G., Linkov A.O. Improvement of the AC locomotive power circuit in a regenerative braking mode.....	346

Metallurgy and Materials Science

✎ Gorlanov E.S. Features of solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis...	356
✎ Mamyachenkov S.V., Yakornov S.A., Anisimova O.S., Bludova D.I. Review of research results of zinc powder electrolytic production from alkaline solutions.....	367
✎ Ris A.D., Sundurov A.V., Dubovikov O.A. Bauxite concentrate behaviour at the leaching stage in the Bayer process.....	395
✎ Salamatov O.V., Salamatov V.I. To flocculant effect on the kinetics of dewatering and washing processes of red muds from low silicon bauxites in alumina production.....	404
✎ Yakovleva A.A., Nemchinova N.V. Local clay prospects to be used in metallurgical practice	415



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Уважаемые читатели!

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

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

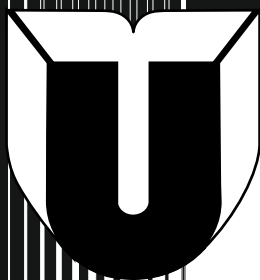
«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую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

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Dear Readers!

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

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

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

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

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

Editorial Board





Оригинальная статья / Original article

УДК 621.512

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-205-213>

Анализ нагруженного состояния цилиндра ступени тихоходного поршневого агрегата при сжатии жидкостей и газов

© И.П. Аистов, К.А. Вансович, С.С. Бусаров, Д.С. Титов, А.В. Недовенчаный

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Резюме: Цель – провести анализ напряженно-деформированного состояния цилиндра тихоходной ступени длинноходового поршневого компрессорного и насосного агрегата при нагружении внутренним давлением (учитывая температуру его стенок). Проанализирован характер рабочего процесса для обоих агрегатов с учетом особенностей работы того и другого. Подтверждена актуальность определения зазоров длинноходовых агрегатов, поскольку возникающие при этом зазоры существенно влияют на рабочий процесс и эффективность работы агрегата в целом. Сравнительный анализ показал, что основной вклад в деформированное состояние при работе данных агрегатов вносит именно температурное воздействие. Проведенные расчеты дают возможность оптимального проектирования конструкции поршневых ступеней в условиях температурных нагрузок с учетом реальных зазоров в цилиндропоршневом уплотнении, возникающих при деформированном состоянии.

Ключевые слова: тихоходный поршневой агрегат, напряженно-деформированное состояние, радиальные перемещения стенок цилиндра, прочность, эквивалентные напряжения, температурные нагрузки

Информация о статье: Дата поступления 15 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 18 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Аистов И.П., Вансович К.А., Бусаров С.С., Титов Д.С., Недовенчаный А.В. Анализ нагруженного состояния цилиндра ступени тихоходного поршневого агрегата при сжатии жидкостей и газов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 205–213. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-205-213.

Analysis of the loaded state of the cylinder of the low-speed piston unit stage under liquid and gas compression

Igor P. Aistov, Konstantin A. Vansovich, Sergey S. Busarov,
Daniil S. Titov, Aleksey V. Nedovenchaniy

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract: The article analyzes the stress-strain state of the cylinder of the low-speed stage of the long-stroke reciprocating piston compressor and pump unit under loading by internal pressure considering the temperature of its walls. The analysis is given to the nature of the working process of both units with regard to their operation features. The relevance of determining the clearances in the long-stroke units is confirmed, since the gaps that emerge in this case significantly affect unit operation and efficiency as a whole. Comparative analysis has showed the temperature effect to be the main cause of the deformed state of these units when in operation. Conducted calculations provide the possibility for optimal development of the designs of piston stages under conditions of temperature loads taking into account the real clearances in the cylinder-piston seal that occur in the deformed state.

Keywords: low-speed piston unit, stress-strain state, radial travel of cylinder walls, strength, equivalent stresses, temperature loads

Information about the article: Received February 15, 2019; accepted for publication March 18, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Aistov I.P., Vansovich K.A., Busarov S.S., Titov D.S., Nedovenchaniy A.V. Analysis of the loaded state of the cylinder of the low-speed piston unit stage under liquid and gas compression. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 205–213. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-205-213.

Введение

В статье рассматривается напряженно-деформированное состояние цилиндра тихоходной ступени длинноходового поршневого агрегата. Особенностью функционирования поршневого агрегата является периодическое изменение давления и температуры рабочего тела в цилиндре [1, 2], которые определяют его нагруженное состояние. Пиковые значения давления в рабочей полости агрегата и температурные воздействия, возникающие при сжатии рабочего тела в полостях агрегата, способствуют образованию усталостных поверхностных трещин в стенках цилиндра [3]. Однако для компрессорных агрегатов, сжимающих газы, и насосных, сжимающих жидкости, есть принципиальное различие по виду диаграммы изменения давления в рабочей камере. Если для насосных агрегатов практически на всем ходе поршня давление можно считать максимальным и постоянным, то для газов, в соответствии с уравнением состояния, давление плавно возрастает, и для рассматриваемых режимов достигает максимального значения в процессе нагнетания на последних 10% хода поршня. К тому же различны и температурные режимы рассматриваемых агрегатов.

Ранее, в работах [4, 5] авторами произведена оценка напряженно-деформированного состояния цилиндра тихоходной ступени длинноходового поршневого агрегата двух типоразмеров: первый вариант – диаметр цилиндра 0,02 м; ход поршня 0,2 м; длина цилиндра 0,3 м; толщина стенки цилиндра варьировалась от 1,5 до 2,5 мм; температура газа на всасывании 295 К; давление всасывания 0,1 МПа; давление нагнетания до 10 МПа [6]; и, второй вариант – диаметр цилиндра 0,05 м; ход поршня 0,5 м;

толщина стенки цилиндра 2 мм; температура газа на всасывании 290 К; давление всасывания – 0,1 МПа; давление нагнетания – до 12 МПа [7]. В статье [4] проведен комплексный анализ влияния толщины и материала стенки цилиндра на эффективность охлаждения сжимаемого газа с обеспечением требуемой прочности. В работе [5] также проведен анализ напряженно-деформированного состояния цилиндра тихоходной ступени длинноходового поршневого агрегата с учетом температуры стенки цилиндра, который показал значительное ее влияние на деформацию и величину действующих напряжений цилиндра агрегата. В расчетах принималось, что конструктивно торцы цилиндра поршневого агрегата были защемлены по торцам без учета жесткости опор.

В работах [6–8] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований параметров нагнетаемого газа для тихоходных ступеней длинноходовых поршневых компрессоров, упомянутых выше. В частности показано, что средняя температура нагнетаемого газа достигает 450 К без охлаждения и 375–400 К – с водяным охлаждением. Таким образом, реальные величины температуры стенки цилиндра тихоходной ступени агрегата могут достигать значительных величин.

Оценка возникающих в процессе работы агрегата деформаций является актуальной задачей, поскольку деформированное состояние влияет на зазоры в уплотнениях рабочей камеры, и, следовательно, на эффективность рабочего процесса. Без точной информации о возникающих деформациях невозможно моделирование новых вариантов ступеней тихоходных агрегатов.

Методика исследования

В работе рассматривается совместное влияние давления, действующего в зоне нагнетания тихоходного агрегата, и температуры сжимаемого газа на радиальные перемещения цилиндрической обо-

лочка, а также на величину напряжений в стенке цилиндра.

Исследование выполнено с использованием программного комплекса ANSYS Workbench Mechanical (ПК ANSYS WM) [9].



Данная программа позволяет учитывать изменение внутреннего давления по длине цилиндра для любого положения поршня, моделируя при этом различные условия контакта между подвижными элементами агрегата.

Анализ проводился при следующих геометрических условиях: диаметр цилиндра 0,05 м; ход поршня 0,5 м; длина цилиндра – 0,55 м; толщина стенки цилиндра принималась 2 и 3 мм.

Основные размеры рассматриваемой геометрической модели компрессорного агрегата приведены на рис. 1. Было рассмотрено два положения поршня: 1) $X = 480$ мм (размер зоны нагнетания – 20 мм), при давлении в зоне нагнетания – 8 МПа; 2) $X = 490$ мм (размер зоны нагнетания – 10 мм), при давлении в зоне нагнетания – 12 МПа (рис. 1).

Для повышения точности моделирования градиента деформаций по толщине цилиндра сетка элементов выполнена трехслойной. Каждый из элементов цилиндра моделируется отдельным трехмерным телом (solid) с возможностью изменения его механических характеристик.

Взаимодействие между отдельными деталями моделировалось путем назначения контактов между ними (Connections → Contacts). В зоне нагнетания защемление цилиндра моделировалось сваркой с опорной пластиной путем задания неразрывного контакта на границе соединения тел – Bonded-Solid To Solid. Подвижный контакт между стенкой цилиндра и уплотнением поршня агрегата задан коэффициентом трения $f = 0,2$ между сталью и уплотнением – граничным условием Frictional (материал

уплотнения – Флубон 20).

Приняты следующие условия закрепления цилиндра агрегата, которые являются одним из известных вариантов конструкций: защемление цилиндра со стороны зоны нагнетания и «плавающая» опора со стороны привода поршня [10].

Со стороны привода агрегата рассматривалась скользящая цилиндрическая опора, которая компенсирует развитие продольных сжимающих напряжений за счет свободного перемещения вдоль оси цилиндра. Такая опора также позволяет избежать потери устойчивости цилиндрической оболочки при ее нагревании и расширении [11]. На рис. 2 приведен пример расчета радиальных перемещений как результат взаимодействия цилиндрической оболочки и подвижной опоры при отсутствии в контакте трения – Frictionless ($f = 0$). За счет температурного расширения цилиндр скользит вдоль своей оси по цилиндрической опоре.

Для моделирования нагрузки на цилиндрическую оболочку агрегата рабочая поверхность цилиндра разбивалась на три части с разными величинами действующего давления. На рис. 3 приведены значения давления в цилиндре для двух положений поршня с тремя участками: I – начальный участок сжатия; II – средний участок (пространство между поршнем с уплотнениями и стенками цилиндра); III – зона нагнетания.

Для анализа влияния температурных воздействий на развитие деформаций и напряжений цилиндра агрегата в расчетной схеме выделены следующие тела: цилиндр тихоходного агрегата, поршень, уплотнения

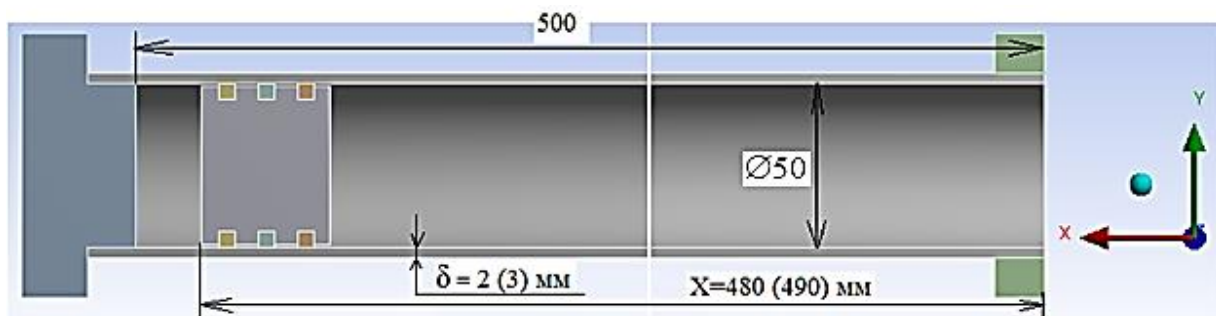


Рис. 1. Геометрическая модель поршневого компрессорного агрегата
Fig. 1. Geometric model of a reciprocating piston compressor unit

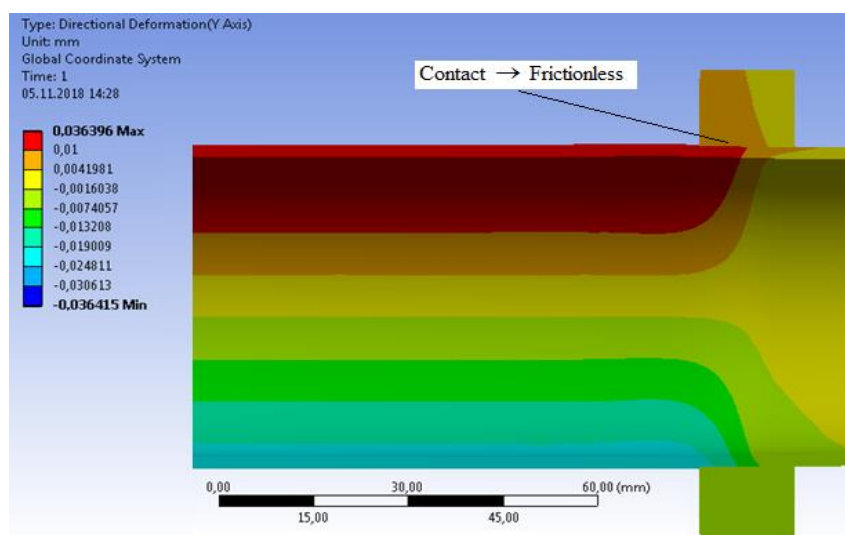


Рис. 2. Скользящая опора цилиндра
Fig. 2. Cylinder slide bearing

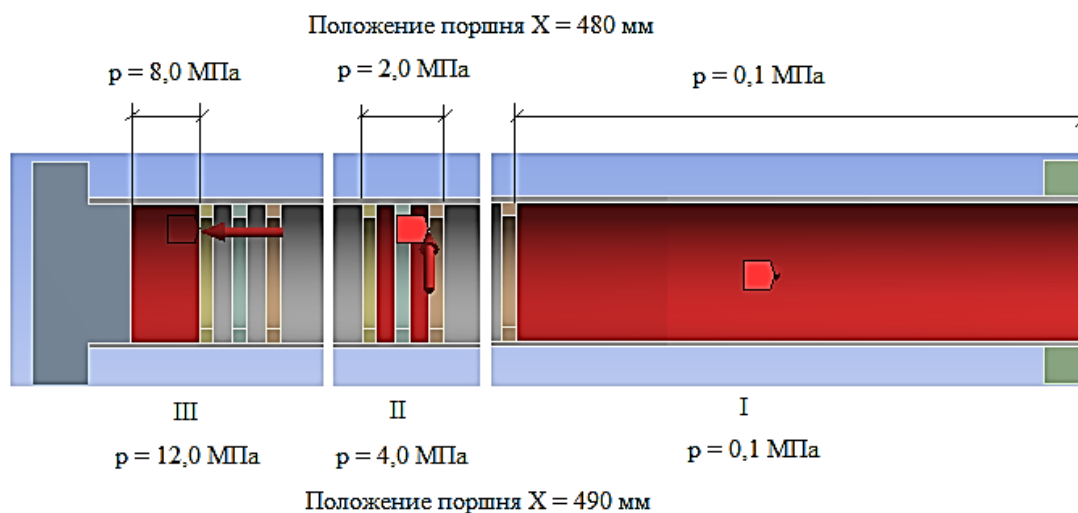


Рис. 3. Моделирование внутреннего давления в цилиндре поршневого агрегата
Fig. 3. Simulation of internal pressure in the piston unit cylinder

поршня (с разными величинами температуры, варианты которых представлены в табл. 1, 2) [12–14].

Механические и физические характеристики материалов, использованных при моделировании агрегата, приведены в табл. 3.

Таблица 1

Расчетные температуры для деталей компрессорного агрегата

Table 1

Design temperatures for compressor unit parts

Тела	Варианты температур, °C		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Цилиндр	150	90	20
Поршень	100	60	20
Уплотнение	120	70	20



Таблица 2

Расчетные температуры для деталей насосного агрегата

Table 2

Design temperatures for pump unit parts

Разновидность тел	Варианты температур, °C		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Цилиндр	60	40	22
Поршень	40	30	22
Уплотнение	50	35	22

Таблица 3

Характеристики материалов

Table 3

Characteristics of materials

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Температурный коэффициент линейного расширения, 1/°C
Сталь 40Х	7850	$2,0 \cdot 10^5$	0,3	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Флубон 20	2130	1300	0,4	$6,6 \cdot 10^{-5}$

Результаты

На рис. 4 представлены диаграммы расчетных значений радиальных перемещений стенок цилиндра компрессорного и насосного агрегата по его длине для двух положений поршня при разных значениях температуры стенки цилиндра и толщине стенки цилиндра 2 и 3 мм.

На рис. 4 представлены диаграммы расчетных значений радиальных перемещений стенок цилиндра насосного агрегата по его длине для двух положений поршня агрегата $X = 35$ мм и $X = 495$ мм, давление в зоне нагнетания в обоих случаях – 12 МПа, при разных значениях температуры стенки цилиндра: 60°C; 40°C; 22°C. Толщина стенки цилиндра – 2 и 3 мм.

На рис. 5 а, б представлены диаграммы расчетных значений эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ цилиндра компрессорного агрегата по его длине для двух положений поршня агрегата – 480 мм (давление в зоне нагнетания – 8 МПа) и 490 мм (давление в зоне нагнетания – 12 МПа) при разных значениях температуры стенки цилиндра 1,2 – 150°C; 3,4 – 90°C; 5,6 – 22°C. Толщина

стенки цилиндра – 2 и 3 мм.

На рис. 5 с, d представлены диаграммы расчетных значений эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ цилиндра насосного агрегата по его длине для двух положений поршня агрегата $X = 35$ мм и $X = 450$ мм, давление в зоне нагнетания в обоих случаях – 12 МПа, при разных значениях температуры стенки цилиндра: 1 – 60°C; 2 – 40°C; 3 – 22°C. Толщина стенки цилиндра – 2 и 3 мм.

Результаты расчетов, приведенных на рис. 4 а, б показывают, что радиальные перемещения стенок цилиндра компрессорного агрегата толщиной 2 и 3 мм могут достигать значений до 55–60 мкм при температуре стенок 150°C (без их охлаждения) и до 30–40 мкм при температуре стенок 90°C (с охлаждением водой). В каждом из этих случаев возникающий зазор между внутренними стенками цилиндра и поршнем достигает значительной величины, которая превышает условные зазоры, указанные в источниках¹ [13] – 0,5 ... 10 мкм.

¹Захаренко В.П. Основы теории уплотнений и создание поршневых компрессоров без смазки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.03; 05.04.06. СПб., 2001. 338 с. / Zakharenko V.P. Fundamentals of the theory of seals and creation of reciprocating compressors without lubrication: Doctoral dissertation in technical sciences: 05.04.03; 04.05.06 SPb., 2001. 338 p.

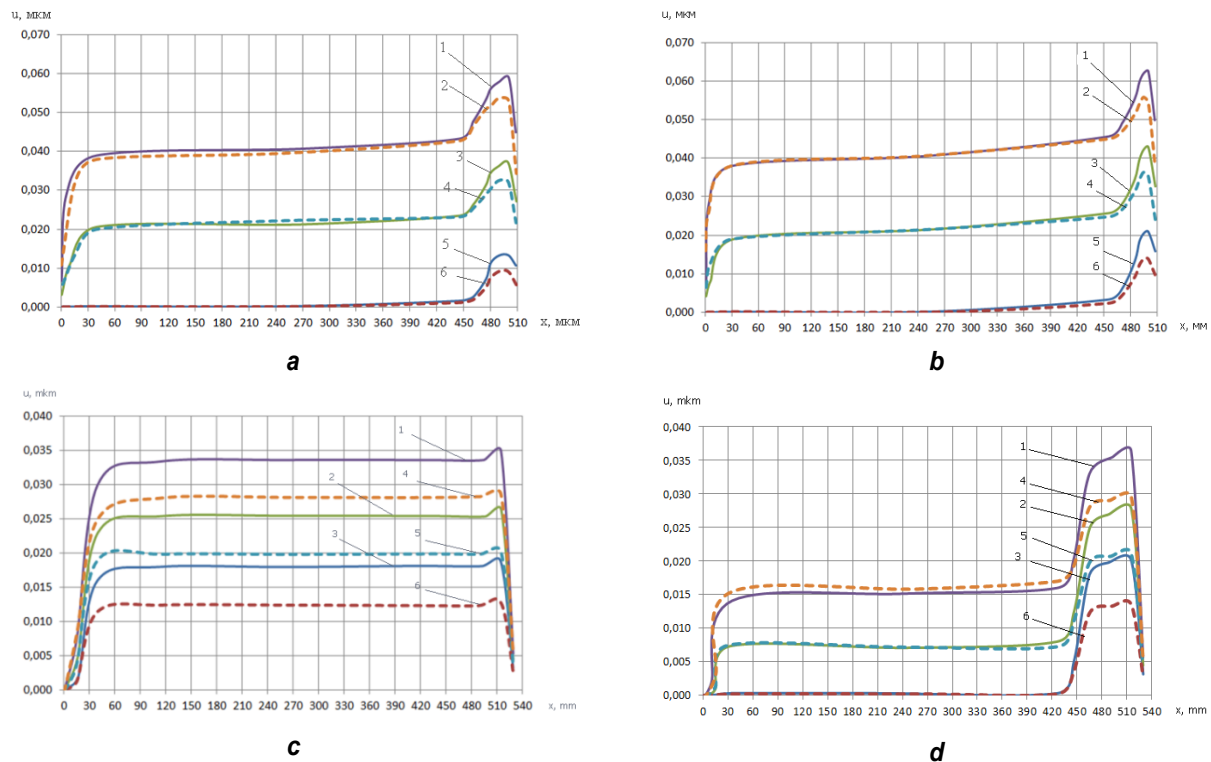


Рис. 4. Радиальные перемещения при различной температуре и толщине стенок: а – положение поршня – 480 мм (давление 8 МПа): 1 – 150 °С, $\delta=2$ мм; 2 – 150 °С, $\delta=3$ мм; 3 – 90 °С, $\delta=2$ мм; 4 – 90 °С, $\delta=3$ мм; 5 – 22 °С, $\delta=2$ мм; 6 – 22 °С, $\delta=3$ мм; б – положение поршня – 490 мм (давление 12 МПа) при температуре стенки цилиндра: 1 – 150 °С, $\delta=2$ мм; 2 – 150 °С, $\delta=3$ мм; 3 – 90 °С, $\delta=2$ мм; 4 – 90 °С, $\delta=3$ мм; 5 – 22 °С, $\delta=2$ мм; 6 – 22 °С, $\delta=3$ мм; в – положение поршня $X = 35$ мм (давление 12 МПа) при температуре стенки цилиндра: 1 – 60 °С, $\delta=2$ мм; 2 – 40 °С, $\delta=3$ мм; 3 – 22 °С, $\delta=2$ мм; 4 – 60 °С, $\delta=3$ мм; 5 – 40 °С, $\delta=2$ мм; 6 – 22 °С; д – положение поршня $X = 495$ мм (давление 12 МПа) при температуре стенки цилиндра: 1 – 60 °С, $\delta=2$ мм; 2 – 40 °С, $\delta=3$ мм; 3 – 22 °С, $\delta=2$ мм; 4 – 60 °С, $\delta=3$ мм; 5 – 40 °С, $\delta=2$ мм; 6 – 22 °С

Fig. 4. Radial travels at various temperatures and thicknesses of walls: а – piston position – 480 mm (pressure of 8 MPa): 1 – 150 °С, $\delta = 2$ mm; 2 – 150 °С, $\delta = 3$ mm; 3 – 90 °С, $\delta = 2$ mm; 4 – 90 °С, $\delta = 3$ mm; 5 – 22 °С, $\delta = 2$ mm; 6 – 22 °С, $\delta = 3$ mm; б – piston position – 490 mm (pressure of 12 MPa) at the cylinder wall temperature of: 1 – 150 °С, $\delta = 2$ mm; 2 – 150 °С, $\delta = 3$ mm; 3 – 90 °С, $\delta = 2$ mm; 4 – 90 °С, $\delta = 3$ mm; 5 – 22 °С, $\delta = 2$ mm; 6 – 22 °С, $\delta = 3$ mm; в – piston position $X = 35$ mm (pressure of 12 MPa) at the cylinder wall temperature of: 1 – 60 °С, $\delta = 2$ mm; 2 – 40 °С, $\delta = 3$ mm; 3 – 22 °С, $\delta = 2$ mm; 4 – 60 °С, $\delta = 3$ mm; 5 – 40 °С, $\delta = 2$ mm; 6 – 22 °С; д – piston position $X = 495$ mm (pressure of 12 MPa) at the cylinder wall temperature of: 1 – 60 °С, $\delta = 2$ mm; 2 – 40 °С, $\delta = 3$ mm; 3 – 22 °С, $\delta = 2$ mm; 4 – 60 °С, $\delta = 3$ mm; 5 – 40 °С, $\delta = 2$ mm; 6 – 22 °С

Результаты расчетов, приведенных на рис. 5, показывают, что наиболее значительный уровень напряжений в материале стенок цилиндра наблюдается в зонах опор (более 200 МПа). В зоне нагнетания (зона нагнетания III, см. рис. 3), значения эквивалентных напряжений в материале стенок цилиндра составляют до 170 МПа при толщине стенки 2 мм и до 130 МПа при толщине стенки 3 мм.

Результаты расчетов, приведенных на рис. 4 с, д показывают, что радиальные перемещения стенок цилиндра насоса толщиной 2 и 3 мм могут достигать значений до

30...37 мкм при температуре стенок 60 °С (без их охлаждения) и до 22...27 мкм при температуре стенок 40 °С (с охлаждением водой). В каждом из этих случаев образующий зазор между внутренними стенками цилиндра и поршнем насоса достигает значительной величины, которая превышает допустимое значение порядка 10–15 мкм [14, 15].

Результаты расчетов, приведенных на рис. 5, показывают, что наиболее значительный уровень напряжений в материале стенки цилиндра агрегата – до 220 МПа – наблюдается в зоне нагнетания насоса.

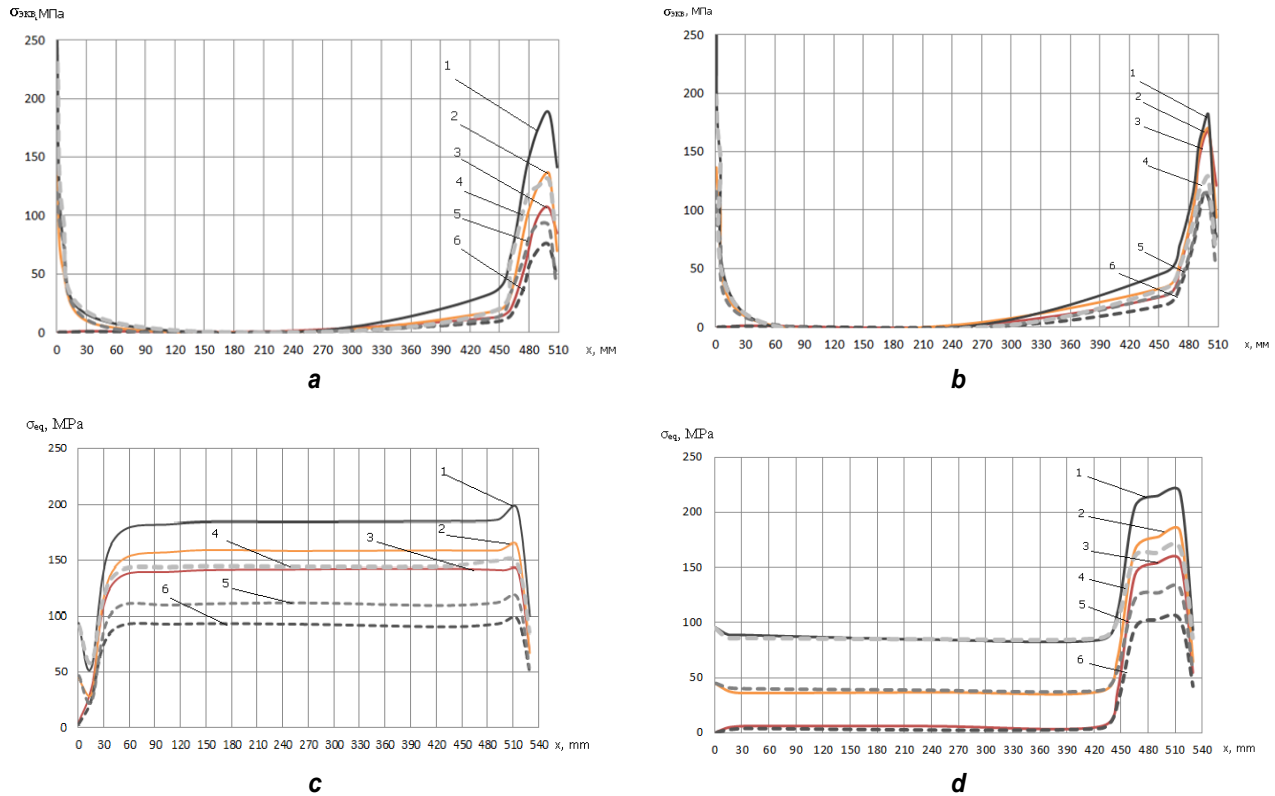


Рис. 5. Эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$ цилиндра агрегата: а – положение поршня – 480 мм (давление 8 МПа): 1 – 150 °С, $\delta=2$ мм; 2 – 150 °С, $\delta=3$ мм; 3 – 90 °С, $\delta=2$ мм; 4 – 90 °С, $\delta=3$ мм; 5 – 22 °С, $\delta=2$ мм; 6 – 22 °С, $\delta=3$ мм; б – положение поршня – 490 мм (давление 12 МПа): 1 – 150 °С, $\delta=2$ мм; 2 – 150 °С, $\delta=3$ мм; 3 – 90 °С, $\delta=2$ мм; 4 – 90 °С, $\delta=3$ мм; 5 – 22 °С, $\delta=2$ мм; 6 – 22 °С, $\delta=3$ мм; в – положение поршня $X = 35$ мм (давление 12 МПа) при температуре стенки цилиндра: 1 – 60 °С, $\delta=2$ мм; 2 – 40 °С, $\delta=3$ мм; 3 – 22 °С, $\delta=2$ мм; 4 – 60 °С, $\delta=3$ мм; 5 – 40 °С, $\delta=2$ мм; 6 – 22 °С; д – положение поршня $X = 495$ мм (давление 12 МПа) при температуре стенки цилиндра: 1 – 60 °С, $\delta=2$ мм; 2 – 40 °С, $\delta=3$ мм; 3 – 22 °С, $\delta=2$ мм; 4 – 60 °С, $\delta=3$ мм; 5 – 40 °С, $\delta=2$ мм; 6 – 22 °С

Fig. 5. Equivalent stresses $\sigma_{экв}$ of the unit cylinder: а – piston position – 480 mm (pressure of 8 Mpa): 1 – 150 °С, $\delta = 2$ mm; 2 – 150 °С, $\delta = 3$ mm; 3 – 90 °С, $\delta = 2$ mm; 4 – 90 °С, $\delta = 3$ mm; 5 – 22 °С, $\delta = 2$ mm; 6 – 22 °С, $\delta = 3$ mm; б – piston position – 490 mm (pressure of 12 MPa): 1 – 150 °С, $\delta = 2$ mm; 2 – 150 °С, $\delta = 3$ mm; 3 – 90 °С, $\delta = 2$ mm; 4 – 90 °С, $\delta = 3$ mm; 5 – 22 °С, $\delta = 2$ mm; 6 – 22 °С, $\delta = 3$ mm; в – piston position $X = 35$ mm (pressure of 12 MPa) at the cylinder wall temperature of: 1 – 60 °С, $\delta = 2$ mm; 2 – 40 °С, $\delta = 3$ mm; 3 – 22 °С, $\delta = 2$ mm; 4 – 60 °С, $\delta = 3$ mm; 5 – 40 °С, $\delta = 2$ mm; 6 – 22 °С; д – piston position $X = 495$ mm (pressure of 12 MPa) at the cylinder wall temperature of: 1 – 60 °С, $\delta = 2$ mm; 2 – 40 °С, $\delta = 3$ mm; 3 – 22 °С, $\delta = 2$ mm; 4 – 60 °С, $\delta = 3$ mm; 5 – 40 °С, $\delta = 2$ mm; 6 – 22 °С

Заключение

Полученные результаты анализа напряженно-деформированного состояния цилиндра тихоходной ступени длинноходового поршневого компрессорного агрегата показывают значительное влияние температуры стенки цилиндра на их деформацию в первую очередь в зоне нагнетания. Анализ полученных результатов (рис. 4) показывает, что для снижения деформации стенок цилиндра до допустимых значений величины зазора между внутренними стенками

цилиндра и поршнем компрессора необходимо интенсифицировать процессы охлаждения стенок цилиндра.

Сравнительный анализ деформаций цилиндра компрессорного и насосного агрегатов показал, что при одинаковом давлении деформации у компрессорного агрегата превосходят значения деформаций насосного. Объясняется это тем, что в зоне нагнетания основной вклад в росте нагруженного состояния в стенках цилиндра вносят тем-

пературные воздействия, а в принятом расчете максимальная температура насосного агрегата принята равной 60°C, а компрессорного – 150°C. Значительный уровень напряжений в материале стенок цилиндров в обеих конструкциях, прилегающих к опорам, требует дальнейших исследований напряженного состояния цилиндра агрегата

для разных конструктивных решений закрепления цилиндра в опорах цилиндра.

Таким образом, для более обширного анализа напряженно-деформированного состояния необходимо расширить перечень исследуемых материалов и конструктивных параметров ступени длинноходового поршневого агрегата и оптимизации его конструктивных решений.

Библиографический список

1. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры: в 2 т. Теория и расчет. М.: Колос, 2006. Т. 1. 456 с.
2. E. Shashi Menon, Working Guide to Pump and Pumping Stations. 2010. 304 p.
3. Пластинин П.И., Юша В.Л., Бусаров С.С. Анализ нестационарных температурных полей в стенках цилиндра компрессорной ступени // Омский научный вестник. 2006. № 5 (41). С. 96–101.
4. Yusha V.L. Influence of wall thickness and properties of structural materials on the discharge temperature and strength characteristics of slow-speed long-stroke stages // Oil and Gas Engineering (OGE-2017).
5. Aistov I.P., Vansovich K.A., Busarov S.S., Titov D.S. Evaluation of Stress-Strain State of the Slow-Speed Compressor Cylinder // Oil and Gas Engineering (OGE-2018). AIP Conf. Proc. 2007. 030064-1–030064-7.
6. Бусаров С.С., Юша В.Л., Недовенчаный А.В., Громов А.Ю. Анализ температурного состояния интенсивно охлаждаемой длинноходовой тихоходной ступени поршневого компрессора // Низкотемпературные и пищевые технологии в XX веке: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Санкт-Петербург, 17-20 ноября 2015 г.). Санкт-Петербург, 2015. С. 66–69.
7. Юша В.Л., Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Гошля Р.Ю. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходовых бессмазочных поршневых компрессорных ступеней при высоких отношениях давлений нагнетания к давлению всасывания // Омский научный вестник. Серия: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2. № 2. С. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18.
8. Юша В.Л., Бусаров С.С., Гошля Р.Ю., Недовенча-

- ный А.В., Бусаров И.С., Титов Д.С. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходной длинноходовой ступени поршневого компрессора // Динамика систем механизмов и машин. 2016. № 4. С. 356–362.
9. Madenci E., Guven I. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. DOI: 10.1007/978-1-4899-7550-8.
10. Поспелов Г.А., Пластинин П.И., Шварц А.И. и др. Объемные компрессоры: атлас конструкций. М.: Машиностроение, 1994. 120 с.
11. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. М.: Наука, 1978. 360 с.
12. Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchanyi A.V., Gromov A.Yu., Dengin V.G. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors / Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 264–269 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.333>. (дата обращения: 24.01.2019).
13. Кузнецов Л.Г., Иванов Д.Н., Молодова Ю.И., Берлин Е.А., Прилуцкий А.А. Оценка герметичности компрессорных ступеней с учетом износа уплотнений поршней при эксплуатации. М.: Холодильная техника, 2004. № 3. С. 28–31.
14. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы; 4-е изд., стер., 1982. М.: Изд. Дом Альянс, 2010. 423 с.
15. Болштынский А.П., Калашников Б.А., Блинов В.Н., Парамонов А.М. Влияние зазора в цилиндропоршневой паре на характеристики поршневого насос-компрессора // Омский научный вестник. 2012. № 1 (107). С. 68–70.

References

1. Plastinin P.I. *Porshnevye kompressory. Teoriya i raschet* [Piston Compressors. Theory and Calculation]. Moscow: Kolos Publ., 2000, vol. 1, 456 p. (In Russ.).
2. E. Shashi Menon, Working Guide to Pump and Pumping Stations, 2010, 304 p.
3. Plastinin P.I., Yusha V.L., Busarov S.S. Analysis of changing temperature fields in walls of compressor's stage cylinder // Omskij nauchnyj vestnik [Omsk Scientific Bulletin]. 2006. № 5 (Issue 39). S. 96–101. (In Russ.).
4. Yusha V.L. Influence of wall thickness and properties of structural materials on the discharge temperature and strength characteristics of slow-speed long-stroke

- stages // Oil and Gas Engineering (OGE-2017). AIP Conf. Proc. 1876 – 020040-1–020040-8.
5. Aistov I.P., Vansovich K.A., Busarov S.S., Titov D.S. Evaluation of Stress-Strain State of the Slow-Speed Compressor Cylinder // Oil and Gas Engineering (OGE-2018). AIP Conf. Proc. 2007. 030064-1–030064-7.
6. Busarov S.S., Yusha V.L., Nedovenchanyj A.V., Gromov A.Yu. *Analiz temperaturnogo sostoyaniya intensivno ohlazhdaemoj dlinnohodovoj tihoходной stupeni porshnevogo kompressora* [Analysis of thermal state of rapidly cooled long-stroke low-speed stage reciprocating compressor]. *Materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Nizkotemperaturnye i*



pishchevyte tekhnologii v XX veke [Proceedings of VII International scientific and technical conference "Low temperature and food technologies in XX century", Saint-Petersburg, 17-20 November 2015]. Saint-Petersburg, 2015, pp. 66–69. (In Russ.).

7. Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchanyj A.V., Goshlya R.Yu. Experimental study of working processes of low-speed long-stroke lubrication free piston compressor stages at high discharge pressure to suction pressures. *Omskij nauchnyj vestnik. Seriya: Aviacionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie* [Omsk Scientific Bulletin. Series «Aviation-Rocket and Power Engineering»], 2018, vol. 2, no. 2, pp. 13–18. (In Russ.). DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18.

8. Yusha V.L., Busarov S.S., Goshlya R.Yu., Nedovenchanyj A.V., Busarov I.S., Titov D.S. Experimental study of working processes of low-speed long-stroke stage reciprocating compressor. *Dinamika sistem mekhanizmov i mashin* [Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)], 2016, vol. 2, no. 1, pp. 356–362. (In Russ.).

9. Madenci E., Guven I. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. DOI: 10.1007/978-1-4899-7550-8.

10. Pospelov G.A., Plastitin P.I., Shvarc A.I. [et al.] *Ob'emnye kompressory: atlas konstrukcij* [Volumetric

compressors: Atlas of designs]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1994, 120 p. (In Russ.).

11. Grigolyuk E.I., Kabanov V.V. *Ustojchivost' obolochek* [Shell stability]. Moscow: Nauka Publ., 1978, 360 p. (In Russ.).

12. Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchanyj A.V., Gromov A.Yu., Dengin V.G., The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 113, pp. 264–269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.333>. (accessed 24 January 2019).

13. Kuznecov L.G., Ivanov D.N., Molodova Yu.I., Berlin E.A., Priluckij A.A. Evaluation of compressor stage tightness taking into account the wear of piston seals during operation. *Holodil'naya tekhnika* [Refrigeration equipment], M.: Holodil'naya tekhnika Publ., 2004, no. 3, pp. 28–31.

14. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow: Al'yans Publishing House, 2010, 423 p.

15. Bolshtyanskij A.P., Kalashnikov B.A., Blinov V.N., Paramonov A.M. Influence of clearance in the piston-cylinder pair on characteristics of a piston pump compressor. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2012, no. 1 (107), pp. 68–70.

Критерии авторства

Аистов И.П., Вансович К.А., Бусаров С.С., Титов Д.С., Недовенчаный А.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аистов Игорь Петрович,

доктор технических наук, профессор,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия;
e-mail: aistov_i@mail.ru

Вансович Константин Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия;
e-mail: vansovichka@mail.ru

Бусаров Сергей Сергеевич,

кандидат технических наук, доцент,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия;
e-mail: bssi1980@mail.ru

Титов Даниил Сергеевич,

соискатель,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия;
e-mail: xltitov@rambler.ru

Недовенчаный Алексей Васильевич,

ассистент,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия;
e-mail: lonewolf_rus88@mail.ru

Authorship criteria

Aistov I.P., Vansovich K.A., Busarov S.S., Titov D.S., Nedovenchanyj A.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor P. Aistov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor
of Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia;
e-mail: aistov_i@mail.ru

Konstantin A. Vansovich,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia;
e-mail: vansovichka@mail.ru

Sergey S. Busarov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia;
e-mail: bssi1980@mail.ru

Daniil S. Titov,

external PHD student
of Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia;
e-mail: xltitov@rambler.ru

Aleksei V. Nedovenchanniy,

Assistant Lecturer
of Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia;
e-mail: lonewolf_rus88@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 62-65; 67.05; 62.868

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-214-224>

Разработка типоразмерного ряда одиночных модулей для печей обжига с механической подовой платформой

© Т.Б. Брянских, А.И. Нижегородов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – разработка типоразмерного ряда одиночных однофазных модулей на основе экспериментальных данных (по испытаниям опытного изделия) для построения на их базе различных компоновочных решений промышленных печей разной производительности. Работа основана на применении экспериментальных данных, полученных методом испытаний опытного изделия, принятых за основу при типизации модуля первого типоразмера. В результате исследований, на основе ранее полученных экспериментальных данных, разработан типоразмерный ряд одиночных однофазных модулей с механической подовой платформой как базовых элементов для конструирования промышленных печей обжига различной производительности. Разработано три типоразмера одиночных модулей с механической подовой платформой для создания промышленных печей различных компоновочных решений вертикального, горизонтального или «лепесткового» типа.

Ключевые слова: одиночный модуль, типоразмерный ряд, механическая подовая платформа, электрическая печь, производительность, потребляемая мощность

Информация о статье: Дата поступления 6 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 13 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Брянских Т.Б., Нижегородов А.И. Разработка типоразмерного ряда одиночных модулей для печей обжига с механической подовой платформой. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 214–224. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-214-224.

Development of a dimension range of single modules for firing furnaces with a mechanical hearth platform

Tatiana B. Bryanskykh, Anatoly I. Nizhegorodov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to develop a dimension range of single-phase modules based on experimental data (experimental product tests) for the construction of various layout solutions of industrial furnaces of different productivity. The study is based on the use of experimental data obtained using the test method of the experimental product. The data serve as the basis for the first dimension size module type designs. Conducted researches and experimental data obtained earlier allowed to work out a dimension range of single-phase modules with a mechanical hearth platform as basic elements for designing of industrial firing furnaces of various productivity. Three standard sizes of single modules with a mechanical hearth platform have been developed for the creation of industrial furnaces of various layout solutions of vertical, horizontal or "leaf" type.

Keywords: single module, dimension range, mechanical hearth platform, electric furnace, productivity, power consumption

Information about the article: Received February 6, 2019; accepted for publication March 13, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Bryanskykh T.B., Nizhegorodov A.I. Development of a dimension range of single modules for firing furnaces with a mechanical hearth platform. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 214–224. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-214-224.

Введение

Вспученный вермикулит, материалы на его основе, строительные и огнезащитные смеси, благодаря своим свойствам,

находят обширное применение в различных сферах человеческой деятельности [1–10], поэтому интерес к технологиям их получе-

ния очень высок. В связи с этим новые электрические печи для обжига вермикулитовых концентратов и конгломератов являются актуальным и перспективным оборудованием.

Появление электрических печей с механической (вибрационной, подвижной) подовой платформой для высокотемпературного обжига вермикулитовых концентратов и других сыпучих материалов [7] остановило развитие электрических модульно-спусковых печных агрегатов, им предшествовавших [8], так как новые печи почти в два раза повысили энергоэффективность. Самые совершенные модульно-спусковые агрегаты с последовательно-параллельным сопряжением модулей и дополнительным неэлектрическим модулем обеспечивали обжиг вермикулита с удельной энергоемкостью процесса около 92–96 мДж/м³ [8], тогда как первый опытный образец печи с вибрационной подовой платформой при испытаниях показал значение 48–52 мДж/м³.

Однако, при последующих испыта-

ниях в 2017 г. были выявлены некоторые (в основном механические) недостатки, на исправление которых ушло почти два года. Теперь, когда эта работа закончена, можно представить наиболее совершенную на данном этапе и наиболее простую конструкцию одиночного (однофазного) модуля печи с механической подовой платформой.

Но для создания промышленной печи нового типа потребуется еще выработка наиболее рациональной компоновки ее элементов: рамных конструкций, дозаторов, механизмов подачи сырья и др. А до того необходимо разработать типоразмерный ряд одиночных модулей обжига к таким печам для получения разной производительности.

Цель работы состоит в разработке типоразмерного ряда одиночных однофазных модулей на основе экспериментальных данных – по испытаниям опытного изделия – для построения на их базе различных компоновочных решений промышленных печей.

Устройство и работа одиночного однофазного модуля

Устройство одиночного модуля, который является базовым энергетическим узлом печи любой компоновки, показано на рис. 1 и 2. В него включены следующие элементы: 1 – подовая плита из жаростойкой стали; 2 – электрические нагреватели; 3 – крышка; 4 – вибрационная подовая платформа с эксцентриковым виброприводом, содержащим эксцентрик 5; 6 – цилиндр; 7 – плунжер с пружиной 8 и приводной двигатель, регулируемый по скорости вращения ω_1 частотным регулятором (на рисунках не показан). Пружины 9 установлены только с левой стороны платформы, с правой стороны расположен специальный нелинейный упругий элемент.

На нижней стороне платформы закреплены направляющие 10, а на раме 11 – держатели 12, в которых размещены оси 13. На оси посажены ролики 14 с округлыми ребрами 15, которыми ролики сопрягаются с округлыми пазами 16 в направляющих 10.

Крепежные головки 17 установлены на крышке модуля на диэлектрических про-

кладках и имеют зажимы в виде пластин, с помощью которых резьбовым соединением электрические нагреватели закреплены на нижней стороне крышки. Дополнительно нагреватели удерживаются в горизонтальном положении за счет фиксаторов, рис. 3 а, состоящих из огнеупорной керамической втулки 18, шайб 19, электроизолирующей шайбы 20, хомутика 21 и втулки 22, выполненных из полосового нихрома.

С правой стороны платформы закреплен упомянутый упругий элемент, рис. 3 б, с сильно выраженной зависимостью силы упругости от перемещения x вибрационной подовой платформы. Он содержит корпус 23 с установленными в нем роликами 24, выполненными с эксцентрично смещенными на величину e осями 25. Резьбовой узел 26 жестко удерживает упругие пластины 27, входящие в контакт с роликами.

Печь работает следующим образом. Нагреватели модуля подключают к сети и прогревают рабочее пространство между подовой плитой 1 и внутренней поверхно-

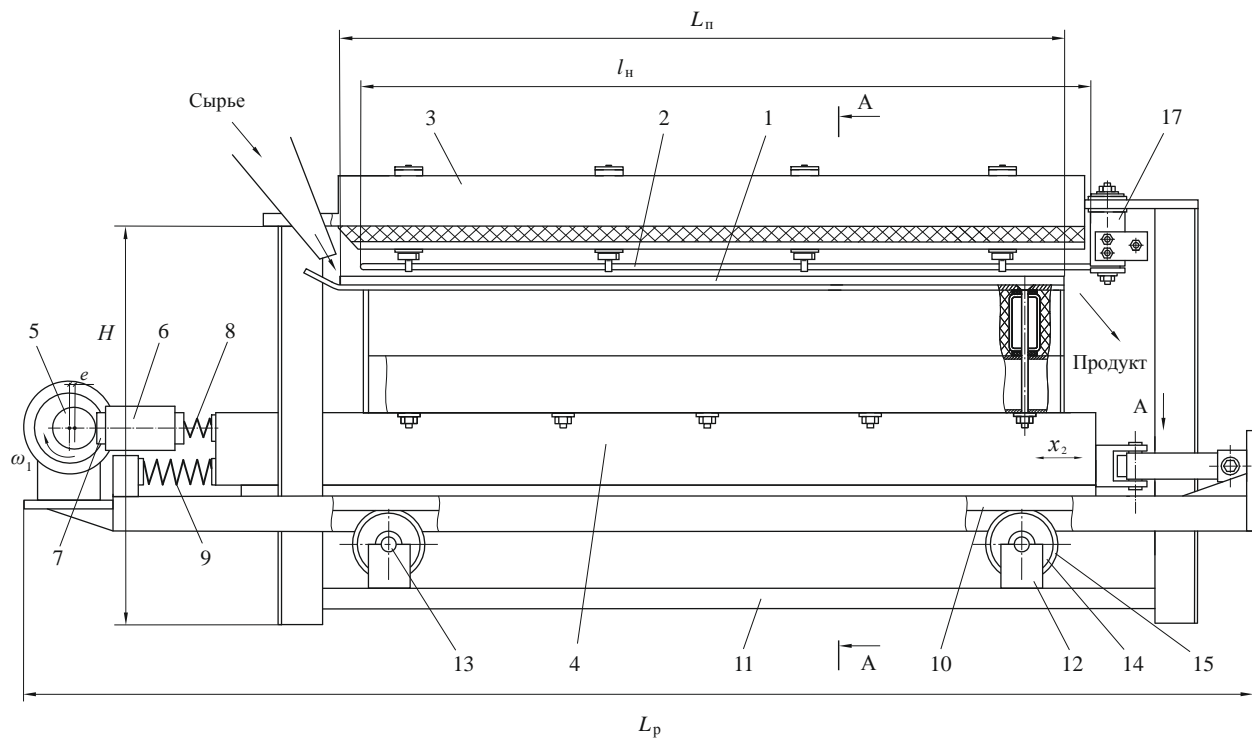


Рис. 1. Одиночный модуль с механической подовой платформой. Вид сбоку
Fig. 1. A single module with a mechanical hearth platform. Side elevation

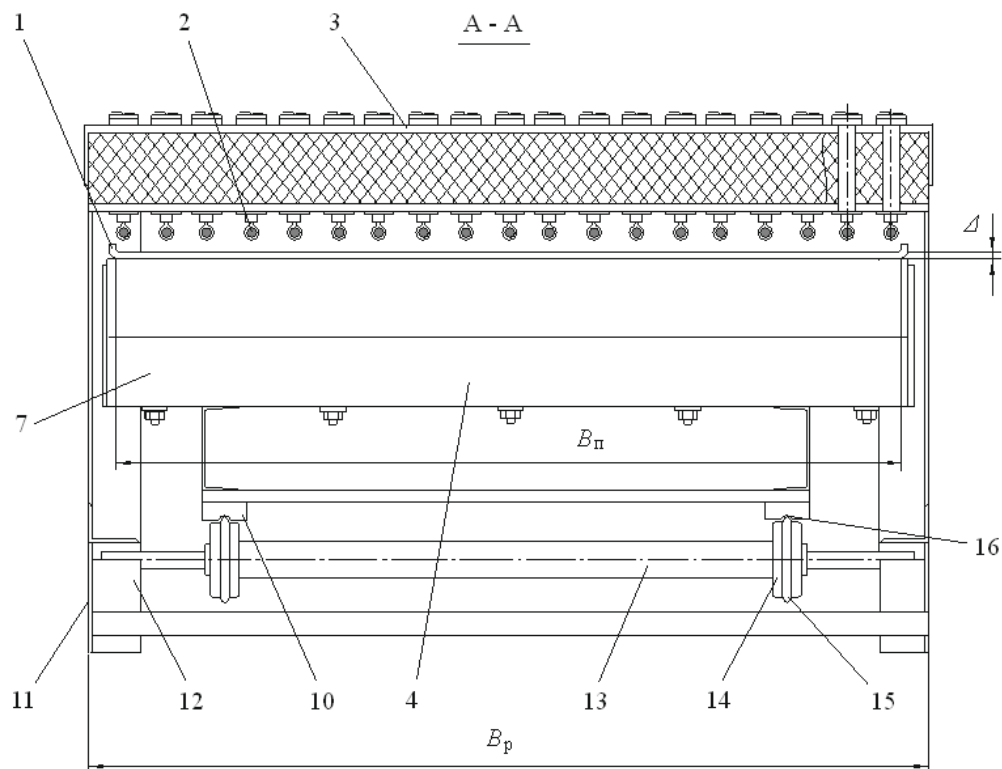


Рис. 2. Одиночный модуль с механической подовой платформой. Поперечный разрез
Fig. 2. A single module with a mechanical hearth platform. Cross-section

стью крышки 3. После прогрева запускают приводной двигатель, эксцентрик 5 задает возвратно-поступательное движение плунжеру 7, сжимающего-разжимающего пружину 8 с частотой возбуждения f_1 (Гц), благодаря чему возбуждаются резонансные колебания x платформы с находящимся на подовой плите вермикулитовым концентратом, подаваемым по лотку. Платформа в процессе колебаний катается вперед-назад на округлых пазах своих направляющих 10 по округлым ребрам роликов 14. Такая новая конструкция устраняет проблему вермикулитовой пыли, которая выходит из печи при обжиге концентрата: здесь пыль не оседает на поверхностях пазов 16, направляющих 10, так как они установлены снизу платформы.

При испытаниях опытного образца было замечено, что присутствие пыли увеличивает трение между роликами и направляющими. Поэтому применена иная конструкция направляющих и роликов для исключения изменений режима колебаний – виброускорения и виброскорости платформы из-за влияния данного фактора. Теперь скорость движения вспучивающегося

на подовой плите вермикулита изменяться не будет, время обжига останется неизменным, а это устраняет возможное снижение производительности печи.

Совокупная жесткость пружин 8 и 9, жесткость упругого элемента и масса платформы определяют собственную частоту ее колебаний f_2 (Гц). При вращении эксцентрика с частотой ω_1 (f_1), равной частоте собственных колебаний платформы f_2 , последней вводится в резонанс.

При движении платформы вправо ролики 24, рис. 3 б, прокатываясь по упругим пластинам 27, отгибают их в стороны и тем сильнее, чем больше увеличивается смещение x . Это приводит к непропорционально большему увеличению силы упругости F_{yn} при смещении платформы на величину x . В данном случае сила упругости равна

$$F_y = 2N_x, \quad (1)$$

где N_x – горизонтальная составляющая нормальной реакции N в точках контакта роликов 24 и пластин 27, N_y – ее вертикальная составляющая, рис. 3.

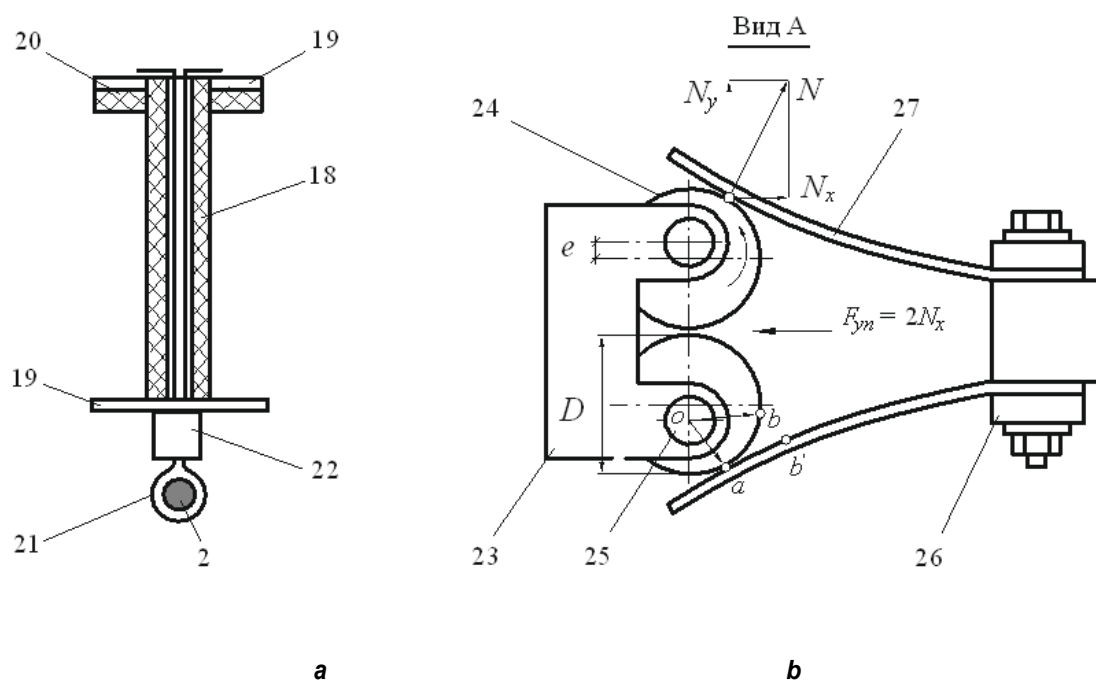


Рис. 3. Фиксатор нагревателей (а), нелинейный упругий элемент (б)
 Fig. 3. Heater lock (а), nonlinear elastic element (б)



Конструкция упругого элемента такова, что благодаря эксцентричной установке роликов 24, упругая сила возрастает еще больше при том же перемещении x платформы. Ролики 24 перекатываются по пластине 27 от точки контакта a до новой точки контакта $b + b'$. При этом перекатывании от t_a до t_b , за счет эксцентриситета e , радиус ob становится больше, чем радиус oa , а это дополнительно отгибает пластины 27 и еще больше увеличивает силу упругости F_y .

Таким образом, из-за сильно выраженной нелинейной зависимости силы упругости F_y от перемещения x формируется переменная жесткость упругого элемента, поэтому в резонансе платформа совершает несимметричные колебания.

Любая колебательная система, имеющая подобный упругий элемент, расположенный с одной стороны, обладает так называемой «мягкой» амплитудно-частотной характеристикой – АЧХ¹, и наш случай – не исключение. Несимметричные колебания создают транспортный эффект² [10]. Если максимум ускорения в крайнем правом положении платформы $\ddot{x}_{2maxП}$ больше, как в нашем случае, чем максимум ускорения в крайнем левом положении $\ddot{x}_{2maxЛ}$, и при

этом имеет место условие:

$$\ddot{x}_{2maxП} > \frac{f_T G}{m_q} > \ddot{x}_{2maxЛ}, \quad (2)$$

При выполнении данного условия весь однослойный массив вермикулитовых зерен будет двигаться вправо без отрыва от поверхности подовой плиты f_T – коэффициент трения вермикулита по подовой плите, m_q – масса вспучивающейся частицы (кг), G – ее вес (Н). На выходе из печи – готовый продукт.

В резонансном режиме можно изменять амплитуду колебаний за счет отстройки частоты возбуждения f_1 от собственной частоты f_2 , обеспечивая изменение средней скорости движения вермикулита по подовой плите и управление временем обжига.

Движение вспучиваемого вермикулита в пространстве обжига одиночного модуля теперь достигается при горизонтальном положении печи, что позволяет устранить охлаждение нагревателей и самого вермикулита, так как температурной тяги, свойственной наклонным модулям, здесь не возникает.

Типоразмерный ряд электрических модулей

Основой унификации машин и агрегатов является разработка типоразмерных рядов при условии неизменности механических, гидравлических, тепловых или иных процессов [10].

Для построения типоразмерного ряда будем исходить из главных размеров опытного образца модуля, показанного на рис. 4, которыми определяются его производительность, количество нагревательных элементов, потребляемая мощность, масса механической подовой платформы и другие

параметры.

Основные параметры подовой плиты и нагревателей опытного изделия:

- длина L_n – 0,4 м;
- ширина B_n – 0,96 м;
- толщина Δ – 0,014 м;
- длина п-образного электрического нагревателя l_n – 0,48 м;
- общее количество нагревательных элементов n – 19 шт;
- площадь сечения нагревательного элемента s – 10 мм² (10·10⁻⁶ м);

¹Вибрации в технике: справочник: в 6 т. М.: Машиностроение, 1981. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. 1981. 509 с. / Vibrations in engineering: reference book: in 6 volumes. M.: Mashinostroenie, 1981. V. 4. Vibration processes and machines. Under edition of E.E. Lavendel. 1981. 509 p.

²Вибрации в технике: справочник: в 6 т. М.: Машиностроение, 1979. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. 1979. 351 с. / Vibrations in engineering: reference book: in 6 volumes. M.: Mashinostroenie, 1979. V. 2. Vibrations of nonlinear mechanical systems / Under edition of I.I. Blekhman. 1979. 351 p.

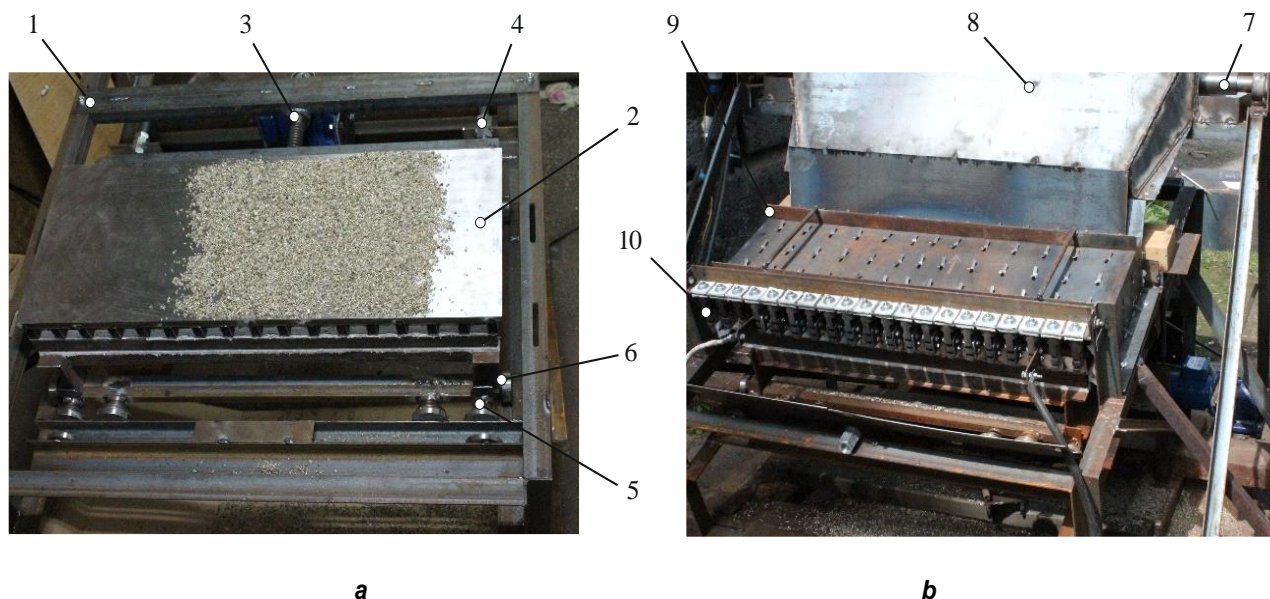


Рис. 4. Опытный образец модуля: а – рама с подовой платформой, б – модуль в сборе;
 1 – рама, 2 – подовая плита, 3 – привод, 4 – регулировочный винт, 5 – пружина, 6 – ролик,
 7 – вал дозатора, 8 – лоток, 9 – крышка модуля, 10 – крепежная головка
Fig. 4. Prototype of the module: а – frame with a hearth platform, б – module assembly;
 1 – frame, 2 – hearth plate, 3 – drive, 4 – adjusting screw, 5 – spring, 6 – roller, 7 – batching shaft,
 8 – chute, 9 – module cover, 10 – mounting head

– относительное количество нагревателей на один метр ширины пода i – 19,79 шт/м;

– масса m – 104 кг.

Основные величины и параметры, определенные при проведении экспериментов:

– средняя по ряду опытов производительность Π_v – 0,7 м³/час (0,195·10⁻³ м³/с);

– коэффициент вспучивания k_v от 8,6 до 9,2 м³/тн (8,6·10⁻³ м³/кг – 9,2 10⁻³ м³/кг);

– потребляемая электрическая мощность N – 9725 Вт;

– средняя удельная энергоемкость обжига вермикулита e – 50,1 мДж/м³.

Основные размеры рамной конструкции:

– ширина B_p – 1,120 м;

– длина (с учетом консоли для приводного двигателя) L_p – 1,42 м;

– относительная длина (отношение длины рамы к длине пода) $l_{от}$ – 3,55;

– высота в горизонтальном положении H – 0,58 м.

Главным переменным параметром является ширина подовой плиты B_n , от которой зависит производительность одиноч-

ного модуля. Учитывая заданные размеры и другие характеристики опытного образца как соответствующие первому наименьшему типоразмеру, определим его относительную производительность:

$$\Pi_{от} = \Pi_v / B_n = 0,7 / 0,96 =$$

$$= 0,729 \text{ м}^2/\text{час} (0,2025 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}). \quad (3)$$

Для создания разных по производительности печей с механической подовой платформой достаточно трех типоразмеров одиночных модулей, так как возможны различные компоновочные решения: вертикальная компоновка, сдвоенная вертикальная, горизонтальная последовательная или параллельная и компоновка лепесткового типа; все они будут рассмотрены в следующей работе.

Исходя из формулы, полученной из выражения (3):

$$\Pi_v = B_n \Pi_{от}, \quad (4)$$

рассчитаем производительность модуля второго и третьего типоразмеров с учетом



относительной производительности, задавая ширину подовых плит:

M_1 – 1-й типоразмер ($B_{п1} = 0,96$ м):
 $P_{л1} = 0,96 \cdot 0,729 = 0,7$ м³/час ($0,195 \cdot 10^{-3}$ м³/с);

M_2 – 2-й типоразмер ($B_{п2} = 1,48$ м):
 $P_{л2} = 1,48 \cdot 0,729 = 1,08$ м³/час ($0,30 \cdot 10^{-3}$ м³/с);

M_3 – 3-й типоразмер ($B_{п3} = 2,0$ м):
 $P_{л3} = 2,0 \cdot 0,729 = 1,46$ м³/час ($0,406 \cdot 10^{-3}$ м³/с).

Определим ширину рам трех типоразмеров печи. Для первого типоразмера $B_{р1}$ задана и равна 1,120 м, а разность $B_{р1} - B_{п1} = 1,12 - 0,96 = 0,16$ м (по 80 мм на сторону). Тогда:

ШР₁ – 1-й типоразмер:

$B_{р1} = B_{п1} + 0,16 = 0,96 + 0,16 = 1,12$ м;

ШР₂ – 2-й типоразмер:

$B_{р2} = B_{п2} + 0,16 = 1,48 + 0,16 = 1,64$ м;

ШР₃ – 3-й типоразмер:

$B_{р3} = B_{п3} + 0,16 = 2,0 + 0,16 = 2,16$ м.

У всех трех типоразмеров рама шире подовой плиты на одинаковую величину – 0,16 м или по 80 мм на сторону, рис. 2.

Толщину подовых плит Δ у второго и третьего типоразмеров модулей надо принимать пропорционально ширине, чтобы исключить прогиб плиты под нагревом, который может достигать температуры 730–750°C при температуре электрических нагревателей 850–940°C.

Поправочный коэффициент определяется отношением:

$$k_{\Delta} = \Delta_1 / B_{п1} = 0,014 / 0,96 = 0,0146. \quad (5)$$

Тогда толщина подовых будет равна:

T_1 – 1-й типоразмер:

$\Delta_1 = k_{\Delta} B_{п1} = 0,0146 \cdot 0,96 = 0,014$ м;

T_2 – 2-й типоразмер:

$\Delta_2 = k_{\Delta} B_{п2} = 0,0146 \cdot 1,48 = 0,0216$ м;

T_3 – 3-й типоразмер:

$\Delta_3 = k_{\Delta} B_{п3} = 0,0146 \cdot 2,0 = 0,0292$ м.

Полученные размеры толщины следует рассматривать как ориентировочные и округлять их исходя из соображений механической обработки подовых плит.

Длины подовых плит для всех типоразмеров одинаковы и равны:

$L_{п1} = 0,4$ м, $L_{п2} = 0,4$ м, $L_{п3} = 0,4$ м.

Рассчитаем по трем типоразмерам длины рамных конструкций с учетом не-

большого увеличения консоли для размещения на ней приводного двигателя.

D_1 – 1-й типоразмер: длина рамы задана и равна $L_{р1} = 1,42$ м.

Для второго и третьего типоразмеров длины рассчитываются по формуле:

$$L_p = L_{п1} l_{от} + l_{доп} m, \quad (6)$$

где $l_{доп}$ – это дополнительное увеличение консольной части рамы под двигатель другого типоразмера, см. рис. 1. Для второго типоразмера $l_{доп}$ примем равным 0,04 м, для третьего – 0,08 м. Тогда:

D_2 – 2-й типоразмер: $L_{р2} = L_{п1} l_{от} + 0,04$ м = $0,4 \cdot 3,55 + 0,04 = 1,46$ м;

D_3 – 3-й типоразмер: $L_{р3} = L_{п1} l_{от} + 0,08$ м = $0,4 \cdot 3,55 + 0,08 = 1,5$ м.

При переходе от одного типоразмера к другому сечение электрических нагревателей не изменяем и оставляем равным для всех $s = 10$ мм² ($10 \cdot 10^{-6}$ м).

Массу подовой плиты (включая рамную конструкцию по ней) можно ориентировочно определить через пропорцию с ее шириной. Для первого типоразмера масса задана $m = 104$ кг.

По аналогии с формулой (5) определим коэффициент поправки массы:

$$k_m = m / B_{п1} = 104 / 0,96 = 108,33 \text{ кг/м.}$$

Тогда для второго и третьего типоразмеров массы подовых плит будут равны:

$M_{м2}$ – 2-й типоразмер: $m_2 = k_m B_{п2} = 108,33 \cdot 1,48 = 160,3$ кг;

$M_{м3}$ – 3-й типоразмер: $m_3 = k_m B_{п3} = 108,33 \cdot 2,0 = 216,7$ кг.

Далее определяем количество нагревательных элементов исходя из ширины подовых плит и числа нагревателей в модуле первого типоразмера, заданного и равного $n_1 = 19$. При этом учитываем, что относительное количество нагревателей на один метр ширины пода равно $i = 19,79$ шт/м.

Тогда:

K_2 – 2-й типоразмер: $n_2 = i$

$B_{п2} = 19,79 \cdot 1,48 = 29,28$. Округляем до 29 шт.;

K_3 – 3-й типоразмер: $n_3 = i$

$B_{п3} = 19,79 \cdot 2,0 = 39,58$. Округляем до 39 шт.

Перейдем к определению потребляемой мощности и удельной энергоёмкости при обжиге вермикулитовых концентратов.

Сначала рассчитаем относительную мощность, приходящуюся на один нагревательный элемент:

$$N_{от} = N_1 / n_1 = 9725 / 19 = 511,84 \text{ Вт/шт.}$$

Электрическая потребляемая мощность пропорциональна числу нагревательных элементов и определяется по формуле для двух других типоразмеров модулей:

ЭМ₂ – 2-й типоразмер:

$$N_2 = N_{от} n_2 = 511,84 \cdot 29 = 14843 \text{ Вт;}$$

ЭМ₃ – 3-й типоразмер:

$$N_3 = N_{от} n_3 = 511,84 \cdot 39 = 19962 \text{ Вт.}$$

Средняя удельная энергоёмкость обжига определяется по формуле, мДж/м³:

$$e = \frac{N \cdot 3600}{\Pi_v}. \quad (7)$$

Используя полученные данные по производительности и потребляемой мощности, рассчитаем удельную энергоёмкость по двум остальным модулям, мДж/м³:

УЭ₂ – 2-й типоразмер:

$$e_2 = \frac{14843 \cdot 3600}{1,08} = 49,48;$$

УЭ₃ – 3-й типоразмер:

$$e_3 = \frac{19962 \cdot 3600}{1,46} = 49,22.$$

Результаты расчета показывают, что при переходе от одного типоразмера одиночного модуля к другому удельная энергоёмкость процесса обжига вермикулита не изменяется.

Расчет нелинейного упругого элемента платформы

При переходе от одного типоразмера к другому следует учитывать, что собственная частота колебаний платформы f_2 должна сохраняться примерно одинаковой, чтобы не изменялись средняя скорость движения частиц вспучивающегося вермикулита и время их прохождения по подовой плите. Указанные величины были определены экспериментально на опытном изделии, показанном на рис. 4, и установлены в следующих значениях:

– собственная частота колебаний платформы f_2 в диапазоне 7,5–7,7 Гц;

– соответствующая угловая частота ω_2 в диапазоне 47,1–48,4 рад/с;

– среднее время прохождения частиц по подовой плите 2,7–3,0 м.

При таких значениях названных величин достигается полноценное вспучивание вермикулитового концентрата с коэффициентом вспучивания от 8,6 до 9,2 м³/тн (8,6 · 10⁻³ м³/кг – 9,2 · 10⁻³ м³/кг) [8].

При подборе пружин и проектировании специального нелинейного упругого элемента нужно обеспечить примерное равенство собственной частоты механической подовой платформы, которая определяется

по формуле, рад/с:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_x}{m}}, \quad (8)$$

где m – масса подвижной подовой платформы, кг; c_x – среднее значение жесткости нелинейного упругого элемента, соответствующее положению статического равновесия платформы и определяемое по выражению, Н/м:

$$c_x = F_{y0} / x_2. \quad (9)$$

Определить суммарную упругую характеристику в положении статического равновесия можно по формуле:

$$F_{y0} = \left[2cx_0 + c_1x_0 + 4\frac{k}{l_0^4} \right], \quad (10)$$

где x_0 – статическое смещение платформы в пределах 0,002–0,004 м, k – константа с размерностью Н · м⁴, определяемая по выражению [11–14]:



$$k = 3,6 D^2 E J_z, \quad (11)$$

где D – диаметр роликов, м (см. рис. 3 б),

E – модуль упругости стали, Н/м²,
 J_z – осевой момент инерции поперечного сечения, м⁴.

Заключение

На основе результатов экспериментальных исследований (проведенных на опытном изделии) – одиночном модуле печи с механической подовой платформой – получены основные величины и параметры, взятые за базовые для первого типоразмера. На их основе выполнены расчеты для двух других типоразмеров модулей.

Кроме того, принятые за базовые значения размеров и массы подовой плиты и рамной конструкции также взяты за основу

первого типоразмера и пересчитаны на второй и третий типоразмеры.

Все определенные параметры и величины сведены в таблицы.

В табл. 1 приведены основные размеры для трех типоразмеров одиночного модуля.

В табл. 2 приведены величины, характеризующие рабочий процесс одиночного модуля для трех типоразмеров.

Таблица 1

Типоразмерный ряд модулей. Размеры и число нагревателей

Table 1

Module dimension range. Dimensions and the number of heaters

Ширина подовой плиты	М ₁ – 1-й типоразмер 0,96 м	М ₂ – 2-й типоразмер 1,48 м	М ₃ – 3-й типоразмер 2,0 м
Длина подовой плиты	М ₁ – 1-й типоразмер 0,4 м	М ₂ – 2-й типоразмер 0,4 м	М ₃ – 3-й типоразмер 0,4 м
Толщина подовой плиты	Т ₁ – 1-й типоразмер 0,014 м	Т ₂ – 2-й типоразмер 0,0216 м	Т ₃ – 3-й типоразмер 0,0292 м
Масса подовой платформы	М _{м1} – 1-й типоразмер 104,0 кг	М _{м2} – 2-й типоразмер 160,3 кг	М _{м3} – 3-й типоразмер 216,7 кг
Ширина рамы, м	ШР ₁ – 1-й типоразмер 1,12	ШР ₂ – 2-й типоразмер 1,64	ШР ₃ – 3-й типоразмер 2,16
Длина рамы	Д ₁ – 1-й типоразмер 1,42 м	Д ₂ – 2-й типоразмер 1,46 м	Д ₂ – 2-й типоразмер 1,5 м
Число нагревателей	К ₁ – 1-й типоразмер 19 шт.	К ₂ – 2-й типоразмер 29 шт.	К ₃ – 3-й типоразмер 39 шт.

Таблица 2

Типоразмерный ряд модулей. Размеры и число нагревателей

Table 2

Module dimension range. Dimensions and the number of heaters

Производительность одиночного модуля	П _{в1} – 1-й типоразмер 0,7 м ³ /час (0,195·10 ⁻³ м ³ /с)	П _{в2} – 2-й типоразмер 1,08 м ³ /час (0,30·10 ⁻³ м ³ /с)	П _{в3} – 3-й типоразмер 1,46 м ³ /час (0,406·10 ⁻³ м ³ /с)
Потребляемая электрическая мощность	ЭМ ₁ – 1-й типоразмер 9715 Вт	ЭМ ₂ – 2-й типоразмер 14843 Вт	ЭМ ₃ – 3-й типоразмер 19962 Вт
Удельная энергоёмкость обжига	УЭ ₁ – 1-й типоразмер 50,1 мДж/м ³	УЭ ₂ – 2-й типоразмер 49,48 мДж/м ³	УЭ ₃ – 3-й типоразмер 49,22 мДж/м ³

Таким образом, разработано три типоразмера одиночных модулей с механической подовой платформой, но для создания разных по производительности печей этого достаточно, так как возможны различные

компоновочные решения: вертикальная компоновка, сдвоенная вертикальная компоновка, горизонтальная последовательная или параллельная компоновка и компоновка лепесткового типа.

Библиографический список

1. Zvezdin A.V., Bryanskikh T.B. Considering adaptation of electrical ovens with unit-type releasing to peculiarities of thermal energization of mineral raw materials // IOP Conf. Series: materials Science and Engineering. 2017. Vol. 168. P. 012003.
2. Fuks L., Herdzik-Koniecko I. Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low- and medium-level radioactive waste repositories // Applied Clay Science. 2018. Vol. 161. P. 139–150.
3. Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 94. P. 186–192.
4. Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 179. P. 302–306.
5. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants // Applied Clay Science. 2017. Vol. 146. P. 7–13.
6. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. P. 53–62.
7. Патент № 166554 Российская Федерация, МПК F 27 В 9/06. Электрическая печь с вибрационной подовой платформой / Нижегородов А.И.; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. № 2015155496/02; заявл. 23.12.2015; опубл. 27.11.2016. Бюл. № 33.
8. Нижегородов А.И., Звездин А.В. Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 250 с.
9. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. М.: Высш. школа. 1977. 255 с.
10. ГОСТ 23945.0-80. Унификация изделий. Основные положения [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data1/4/4759/index.htm> (15.12.2018).
11. Деформация балок при плоском изгибе [Электронный ресурс]. URL: http://sopromat.vstu.ru/metod/lek/lek_11.pdf (25.01.2018).
12. Нижегородов А.И. Разработка параметрических рядов электрических модульно-спусковых ППС-печей для технологических комплексов по переработке вермикулитовых концентратов. / Строительные и дорожные машины. 2011. №4. С. 19–21.
13. Rits M., Zdralkova J., Valaskova M. Vibrational spectroscopy of acid treated vermiculites / Vibrational spectroscopy. 2014. Vol. 70. P. 63–69.
14. Ден Гартог Дж. П. Механические колебания. М.: Физматгиз, 1960. 455 с.

References

1. Zvezdin A.V., Bryanskikh T.B. Considering adaptation of electrical ovens with unit-type releasing to peculiarities of thermal energization of mineral raw materials. IOP Conf. Series: materials Science and Engineering, 2017, vol. 168, 012003 p.
2. Fuks L., Herdzik-Koniecko I. Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low- and medium-level radioactive waste repositories. Applied Clay Science, 2018, vol. 161, pp. 139–150.
3. Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide. Applied Thermal Engineering, 2016, vol. 94, pp. 186–192.
4. Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. Construction and Building Materials, 2018, vol. 179, pp. 302–306.
5. Sevim İşçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants. Applied Clay Science, 2017, vol. 146, pp. 7–13.
6. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials, 2016. vol. 125, pp. 53–62.
7. Nizhegorodov A.I. *Elektricheskaya pech' s vibratsionnoy podovoj platformoj; zayavitel' i patentoobladatel' Irkutskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet* [Electric furnace with vibration hearth platform]. Patent RF, no. 33, 2016.
8. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V. *Energotekhnologicheskie agregaty dlya pererabotki vermikulitovykh koncentratov* [Energy-technology units for vermiculite concentrate processing]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2015, 250 p. (In Russ.).
9. Bauman V.A., Byhovskij I.I. *Vibratsionnye mashiny i processy v stroitel'stve* [Vibration machines and processes in construction]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1977, 255 p. (In Russ.).
10. GOST 23945.0-80. *Unifikatsiya izdelij. Osnovnye polozheniya* [Product Standardization. Main Principles]. URL: <https://meganorm.ru/Data1/4/4759/index.htm> (December 15, 2018).



11. *Deformaciya balok pri ploskom izgibe* [Beam deformation at plane bending]. URL: http://sopromat.vstu.ru/metod/lek/lek_11.pdf (January 25, 2018).
12. Nizhegorodov A.I. Development parametric series electrical modular triggers PPS-kiln process for processing complexes vermiculite concentrates // Construction and road building machinery. 2011, no. 4, pp. 19–21

Критерии авторства

Брянских Т.Б., Нижегородов А.И. разработали типоразмерный ряд одиночных однофазных модулей. Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Брянских Татьяна Борисовна

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия;
e-mail: broocha@yandex.ru

Нижегородов Анатолий Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия;
e-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

(In Russ.)

13. Rits M., Zdralkova J., Valaskova M. Vibrational spectroscopy of acid treated vermiculites. *Vibrational spectroscopy*. 2014, vol. 70, pp. 63–69.

14. Den Gartog Dzh. P. *Mekhanicheskie kolebaniya* [Mechanical Oscillations]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1960, 455 p. (In Russ.).

Authorship criteria

Bryanskykh T.B., Nizhegorodov A.I. have developed a dimension range of single-phase modules. The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana B. Bryanskykh

Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation;
e-mail: broocha@yandex.ru

Anatoly I. Nizhegorodov

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Hydraulic Systems of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia;
e-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru



Оригинальная статья / Original article
УДК 621.534, 62.752.833; 888.6
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-225-236>

Технологические вибрационные машины – новые подходы в оценке и корректировке динамических состояний. Часть II

© Выонг Куанг Чык*, И.В. Ковригина**, С.В. Елисеев***, Ю.В. Кибирев****

*,**Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

**Забайкальский институт железнодорожного транспорта ИргУПС, г. Чита, Россия

****АО «Труд», г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – рассмотреть особенности динамических свойств, связанные с формированием вибрационного поля рабочего органа вибростенда при различных условиях внешнего динамического нагружения, а также разработать метод динамического синтеза механических колебаний системы, обеспечивающей заданное распределение амплитуд колебаний точек рабочего органа. Используются методы структурного математического моделирования, основанные на применении аналитического аппарата теории автоматического управления. Получены аналитические соотношения, которые позволяют определять граничные условия реализации необходимых режимов. Предлагаются технологии построения математических моделей для настроечных процессов рабочих органов с учетом особенностей и взаимного влияния при действии нескольких динамических факторов. Авторами предлагается использование рычажных связей, создаваемых работой различных механизмов в структуре вибростендов.

Ключевые слова: технологические машины, рабочий орган, вибрационное поле, коррекция форм вибрационного поля, распределение амплитуд колебаний

Информация о статье: Дата поступления 14 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Выонг Куанг Чык, Ковригина И.В., Елисеев С.В., Кибирев Ю.В. Технологические вибрационные машины – новые подходы в оценке и корректировке динамических состояний. Часть II. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. №2. С. 225–236. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-225-236.

Technological vibrating machines – new approaches in dynamic state assessment and correction. Part II

Quang Truc Vuong, I.V. Kovrigina, S.V. Eliseev, Yu.V. Kibirev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Trans-Baikal Institute of Railway Transport of Irkutsk State Transport University, Chita, Russia

"Trud" JSC, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to consider the features of dynamic properties associated with the formation of the shaker working element vibration field under different conditions of external dynamic loading as well as to develop a method of dynamic synthesis of mechanical oscillations of the system that provides a given distribution of the oscillation amplitude of the working element points. The study uses the methods of structural mathematical modeling based on the application of the analytical apparatus of the theory of automatic control. Analytic relationships have been obtained that allow the determination of boundary implementation conditions for necessary modes. The technologies for constructing mathematical models for tuning processes of working elements are proposed considering the features and mutual influence under the action of several dynamic factors. The authors propose the use of lever ties created by the operation of various mechanisms in the structure of vibration tables.

Keywords: technological machines, working element, vibrational field, correction of vibrational field shape, oscillation amplitude distribution

Information about the article: Received February 14, 2019; accepted for publication March 12, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Vuong Quang Truc, Kovrigina I.V., Eliseev S.V., Kibirev Yu.V. Technological vibrating machines – new approaches in dynamic state assessment and correction. Part II. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 225–236. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-225-236.

Введение

Повышение эффективности работы вибрационных технологических машин и транспортных средств различного назначения связано с необходимостью обеспечения регламентов динамических состояний, оценки и контроля форм и особенностей динамических взаимодействий элементов машин [1–4]. В качестве расчетных схем большинства технических объектов, работающих в условиях интенсивного динамического нагружения, используются механические колебательные системы с несколькими степенями свободы, что позволяет создавать достаточно адекватные математические модели в разнообразных задачах динамики машин [5–7].

В технологических машинах, реализующих процессы вибрационной обработки деталей с использованием гранулированных рабочих сред, особое значение имеют возможности настройки и формирования распределения амплитуд колебаний точек рабочих органов или коррекции и настройки вибрационных полей. Определенные возможности в этом направлении имеют разработки, основанные на введении в структуру механических колебательных систем дополнительных связей, которые практически могут быть реализованы с помощью различных механизмов, в том числе рычажных. Как было показано в первой части настоящей статьи, введение таких механизмов [8] при определенных условиях может обладать большим потенциалом возможностей изменения амплитудно-частотных характеристик, форм распределения амплитуд колебаний по длине рабочего органа машины, реализации определенных динамических режимов и др. [9–11].

Во второй части статьи приведены примеры применения, предложенного для построения математических моделей вибрационных технологических машин в условиях совместного действия нескольких силовых факторов.

Метод комплексной оценки действия факторов настройки при формировании однородного вибрационного поля

Анализ АЧХ системы, отражающих влияние внешних параметров и формы совместного действия возмущений, показывает целесообразность развития комплексного подхода. В этом плане перспективным представляется изучение таких особенностей передаточных функций межпарциальных связей, когда отношение амплитуд колебаний по координатам \bar{y}_1 и \bar{y}_2 выбирается равным единице.

Рассматривается передаточная функция межпарциальных связей:

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{-\{[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2(a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1(a + l_0 c)(b - l_0 c)]p^2 + k_2(a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2(a - l'_0 c)(b + l'_0 c)\}}{[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2(b + l'_0 c)^2 + L_1(b - l_0 c)^2]p^2 + k_4 + k_2(b - l_0 c)^2 + k_3 i^2(b + l'_0 c)^2}. \quad (1)$$

Если принять $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, то на этой основе можно получить следующее условие

$$\begin{aligned} & -\{[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2(a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1(a + l_0 c)(b - l_0 c)]p^2 + \\ & + k_2(a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2(a - l'_0 c)(b + l'_0 c)\} = \\ & = [(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2(b + l'_0 c)^2 + L_1(b - l_0 c)^2]p^2 + \\ & + k_4 + k_2(b - l_0 c)^2 + k_3 i^2(b + l'_0 c)^2. \end{aligned} \quad (2)$$



После перегруппировки условия (2) можно записать:

$$[Mb + m_2 i^2 (b + l'_0 c) + L_1 (b - l_0 c)] p^2 + k_4 + k_2 (b - l_0 c) + k_3 i^2 (b + l'_0 c) = 0. \quad (3)$$

Если возможным настроечным параметром рассматривается масса m_2 , то из (3) можно найти соотношения:

$$\begin{cases} m_2 = \frac{-Mb - L_1 (b - l_0 c)}{i^2 (b + l'_0 c)}; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} k_4 + k_2 (b - l_0 c) + k_3 i^2 (b + l'_0 c) = 0. \end{cases} \quad (4')$$

Вместе с тем, из (4) следует, что при положительной массе m_2 можно записать условие:

$$-Mb - L_1 (b - l_0 c) \geq 0, \quad (5)$$

из которого получим, что

$$l_0 \geq \frac{b(M + L_1)}{cL_1} = l_1 \left(1 + \frac{M}{L_1} \right) > l_1. \quad (6)$$

Как следует из (6), очевидно, что такой случай физически не может быть реализован.

Если настроечным параметром выбирается передаточное отношение i , то получим условие:

$$\begin{cases} i^2 = \frac{-Mb - L_1 (b - l_0 c)}{m_2 (b + l'_0 c)}; \\ i^2 = \frac{-k_4 - k_2 (b - l_0 c)}{k_3 (b + l'_0 c)}, \end{cases} \quad (7)$$

из которого можно найти соответствующее соотношение параметров системы

$$m_2 = \frac{k_3 [Mb + L_1 (b - l_0 c)]}{k_4 + k_2 (b - l_0 c)}, \quad (8)$$

которое не может быть выполнено при положительном значении массы m_2 .

При исключении l_0 из выражения (4') и подстановки его в (4), можно получить соотношение

$$m_2 = \frac{-k_2 Mb + L_1 [k_4 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)]}{k_2 i^2 (b + l'_0 c)}, \quad (9)$$

из которого следует, что при заданных параметрах система не может обеспечить положительное значение m_2 .

Таким образом, режим $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$ может возникать только при конкретной частоте, равной

$$\omega^2 = \frac{k_4 + k_2(b - l_0c) + k_3i^2(b + l'_0c)}{Mb + m_2i^2(b + l'_0c) + L_1(b - l_0c)}, \quad (10)$$

которую нельзя изменить.

Совместное действие двух силовых возмущений

1. Случай одновременного совместного действия двух внешних сил $\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 = \bar{Q}$ обладает своими особенностями. Передаточная функция межпарциальной связи при этом может быть получена в виде:

$$W'_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{[(Ma^2 + Jc^2 + m_1b_{01}^2) + m_2i^2(a - l'_0c)^2 + L_1(a + l_0c)^2]p^2 + k_1 + k_2(a + l_0c)^2 + k_3i^2(a - l'_0c)^2 - \{[(Mab - Jc^2) + m_2i^2(a - l'_0c)(b + l'_0c) + L_1(a + l_0c)(b - l_0c)]p^2 + k_2(a + l_0c)(b - l_0c) + k_3i^2(a - l'_0c)(b + l'_0c)\}}{[(Mb^2 + Jc^2) + m_2i^2(b + l'_0c)^2 + L_1(b - l_0c)^2]p^2 + k_4 + k_2(b - l_0c)^2 + k_3i^2(b + l'_0c)^2 - \{[(Mab - Jc^2) + m_2i^2(a - l'_0c)(b + l'_0c) + L_1(a + l_0c)(b - l_0c)]p^2 + k_2(a + l_0c)(b - l_0c) + k_3i^2(a - l'_0c)(b + l'_0c)\}}. \quad (11)$$

2. Особый интерес для исследования динамических свойств системы на основе выражения (11) имеет случай, когда $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, то есть выполняется условие:

$$[(Ma^2 + Jc^2 + m_1b_{01}^2) + m_2i^2(a - l'_0c)^2 + L_1(a + l_0c)^2]p^2 + k_1 + k_2(a + l_0c)^2 + k_3i^2(a - l'_0c)^2 = [(Mb^2 + Jc^2) + m_2i^2(b + l'_0c)^2 + L_1(b - l_0c)^2]p^2 + k_4 + k_2(b - l_0c)^2 + k_3i^2(b + l'_0c)^2, \quad (12)$$

после перегруппировки принимает вид:

$$[M(a - b) + m_1b_{01}^2 + m_2i^2(a - b - 2l'_0c) + L_1(a - b + 2l_0c)]p^2 + k_1 - k_4 + k_2(a - b + 2l_0c) + k_3i^2(a - b - 2l'_0c) = 0. \quad (13)$$

Если настроечным параметром выбирается величина массы m_2 , то (30) выполняется при следующих условиях:

$$\begin{cases} m_2 = \frac{-M(a - b) - m_1b_{01}^2 - L_1(a - b + 2l_0c)}{i^2(a - b - 2l'_0c)}; \\ k_1 - k_4 + k_2(a - b + 2l_0c) + k_3i^2(a - b - 2l'_0c) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

$$(14')$$

Из (14) и (14') можно получить соотношение:



$$i^2(a-b-2l'_0c) = \frac{-k_1+k_4-k_2(a-b+2l_0c)}{k_3}, \quad (15)$$

подставляя которое в (14), находим требуемое значение массы:

$$m_2 = \frac{k_3[-M(a-b)-m_1b_{01}^2-L_1(a-b+2l_0c)]}{-k_1+k_4-k_2(a-b+2l_0c)}. \quad (16)$$

График зависимости массы m_2 от расстояния l_0 представлен на рис. 1.

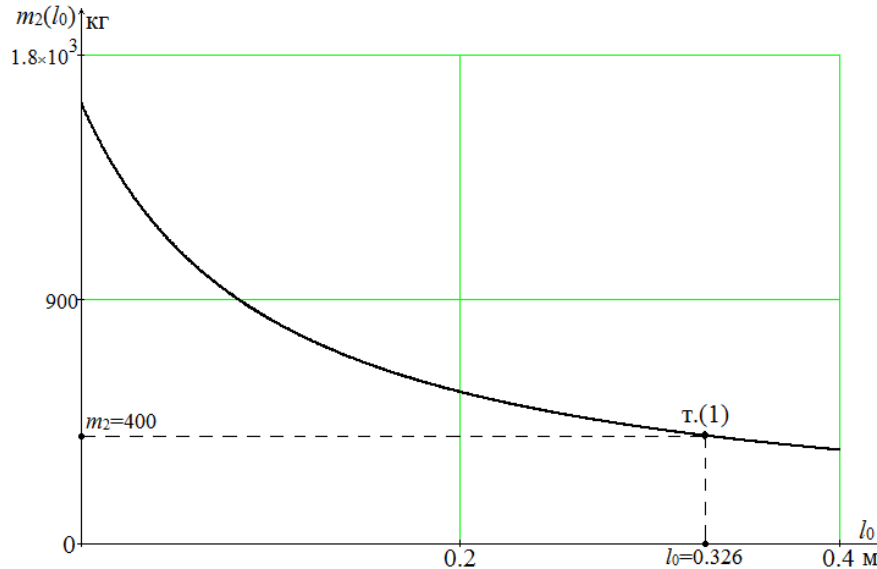


Рис. 1. График зависимости массы m_2 от расстояния l_0 по выражению (16)
Fig. 1. Graph of mass m_2 vs distance l_0 in expression (16)

Из графика $m_2(l_0)$ следует, что режим, обеспечивающий выполнение условия $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, возможен при вариациях параметров m_2 и l_0 в достаточно широких пределах.

3. Если настроечным параметром выбирается передаточное отношение i , то

$$\left\{ \begin{aligned} i^2 &= \frac{-M(a-b)-m_1b_{01}^2-L_1(a-b+2l_0c)}{m_2(a-b-2l'_0c)}; \end{aligned} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{aligned} i^2 &= \frac{-k_1+k_4-k_2(a-b+2l_0c)}{k_3(a-b-2l'_0c)}. \end{aligned} \right. \quad (17')$$

При исключении l_0 , можно получить соотношение параметров в виде

$$i^2 = \frac{L_1(k_1-k_4)-k_2[M(a-b)+m_1b_{01}^2]}{(m_2k_2-L_1k_3)(a-b-2l'_0c)}. \quad (18)$$

Графики зависимости i от массы m_2 и от расстояния l'_0 приведены на рис. 2 а, б, соответственно.

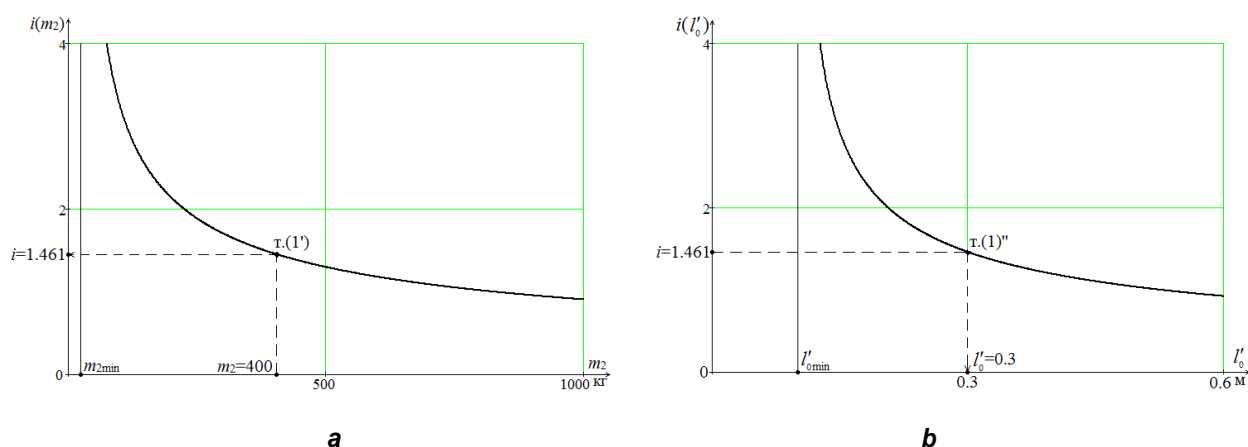


Рис. 2. Графики зависимости передаточного отношения i по выражению (18):

a – от массы m_2 ; b – от расстояния l'_0

Fig. 2. Dependence graphs of the gear ratio i in expression (18): a – by mass m_2 ; b – by distance l'_0

Как следует из графика на рис. 2, по заданным параметрам можно определить минимальные значения массы m_2 и l'_0

$$m_{2\min} = \frac{L_1 k_3}{k_2}; \quad (19)$$

$$l'_{0\min} = \frac{a-b}{2c}. \quad (20)$$

Если принимается масса $m_2 = 400$ кг, то обеспечивается значение $l_0 = 0.326$ м (см. рис. 1, т.(1)), что может быть реализовано условиями модельной задачи. На рис. 2 а, в т. (1') для значения $m_2 = 400$ кг, получим $i = 1.461$, которому в свою очередь в т. (1'') на рис. 2 б, можно найти значение расстояния $l'_0 = 0.3$ м. Для оценки возможности физической реализации условий можно сделать проверку путем подстановки полученных значений l_0 и l'_0 в выражение (17') и найти значение $i = 1.461$, совпадающее с полученным значением на рис. 2 а. Таким образом, при соответствующем выборе настроечных параметров, для вводимых дополнительных связей, реализуемых механизмами, возможно обеспечение условий по созданию требуемой структуры вибрационного поля рабочего органа вибрационной машины. На рис. 3, 4 показаны амплитудно-частотные характеристики системы $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$, $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$ и $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}$.

4. Из сравнения АЧХ системы на рис. 3 а и б следует, что при параметрах системы, определенных условиями выполнения соотношения $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, исходные механические системы трансформируются в системы с одной степенью свободы по координатам \bar{y}_1 и \bar{y}_2 . Это вполне объяснимо требованием подобия при условии $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$. При таких параметрах системы характерным будет и наличие равночастотности собственных колебаний системы. Соответствующую интерпретацию получает и АЧХ межпарциальной связи, которая следует из рис. 4, в данном случае представлена прямой, параллельной оси абсцисс.

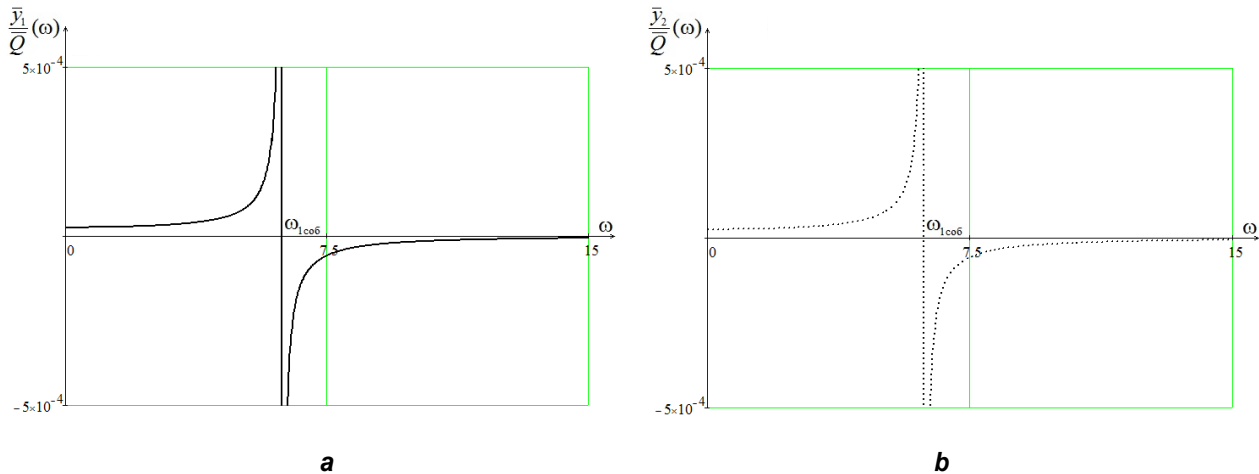


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики системы:

a – кривая (—) соответствует $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$; b – кривая (+ + +) соответствует $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic of the system:

a – curve (—) corresponds to $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$; b – curve (+ + +) corresponds to $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$

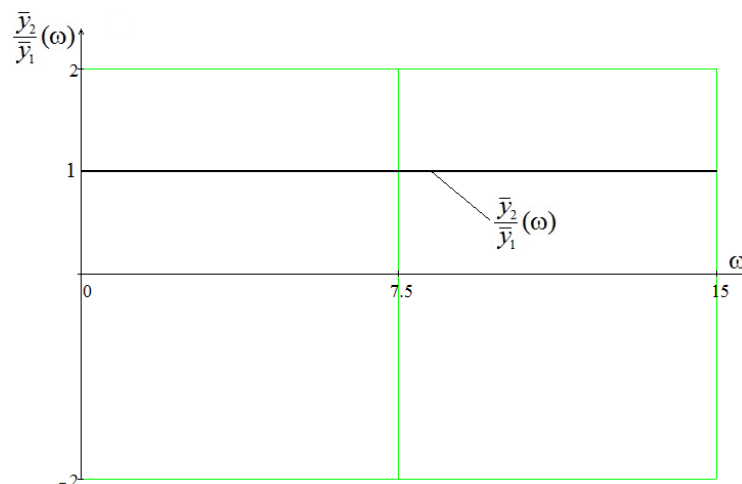


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики межпарциальной связи системы

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of interpartial ties of the system

Особенность ситуации заключается в том, что механическая колебательная система, работающая в таком режиме, для любой частоты внешнего воздействия обеспечивает равенство амплитуд колебаний по координатам \bar{y}_1 и \bar{y}_2 . Естественно, что их отношение будет равно единице. Вместе с тем, сами по себе координаты \bar{y}_1 и \bar{y}_2 на разных частотах будут различными, хотя их соотношение равняется единице [12, 13].

Совместное действие двух неравных между собой силовых факторов

Рассмотрим случай одновременного совместного действия двух внешних сил при условии

$$\bar{Q}_2 = \alpha_0 \bar{Q}_1, \quad (21)$$

где α_0 – коэффициент связности внешних сил (его величина может принимать положительное, отрицательное и нулевое значения).

Передаточные функции системы принимают вид:

$$W_1''(p) = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} = \frac{[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2 (b + l'_0 c)^2 + L_1 (b - l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (b - l_0 c)^2 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)^2 - \alpha_0 \{ [(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) \}}{A'(p)}; \quad (22)$$

$$W_2''(p) = \frac{\bar{y}_2}{Q_1} = \frac{\alpha_0 \{ [(Ma^2 + Jc^2 + m_1 b_{01}^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)^2 + L_1 (a + l_0 c)^2] p^2 + k_1 + k_2 (a + l_0 c)^2 + k_3 i^2 (a - l'_0 c)^2 \} - \{ [(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) \}}{A'(p)}. \quad (23)$$

При этом передаточная функция межпарциальной связи может быть представлена выражением

$$W_{12}''(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha_0 \{ [(Ma^2 + Jc^2 + m_1 b_{01}^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)^2 + L_1 (a + l_0 c)^2] p^2 + k_1 + k_2 (a + l_0 c)^2 + k_3 i^2 (a - l'_0 c)^2 \} - \{ [(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) \}}{[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2 (b + l'_0 c)^2 + L_1 (b - l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (b - l_0 c)^2 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)^2 - \alpha_0 \{ [(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) \}}. \quad (24)$$

Рассмотрим случай, когда $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, то есть

$$\begin{aligned} & \alpha_0 \{ [(Ma^2 + Jc^2 + m_1 b_{01}^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)^2 + L_1 (a + l_0 c)^2] p^2 + k_1 + k_2 (a + l_0 c)^2 + k_3 i^2 (a - l'_0 c)^2 \} - \\ & - \{ [(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) \} = \\ & = [(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2 (b + l'_0 c)^2 + L_1 (b - l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (b - l_0 c)^2 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)^2 - \\ & - \alpha_0 \{ [(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) \}. \end{aligned} \quad (25)$$



После перегруппировки выражения (25) примет вид

$$p^2 \{ \alpha_0 [Ma + m_1 b_{01}^2 + m_2 i^2 (a - l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)] - Mb - m_2 i^2 (b + l'_0 c) - L_1 (b - l_0 c) \} + \alpha_0 [k_1 + k_2 (a + l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)] - k_4 - k_2 (b - l_0 c) - k_3 i^2 (b + l'_0 c) = 0. \quad (26)$$

Из (26) можно найти условие, при котором выполняется $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, что определяется соотношениями:

$$\alpha_0 = \frac{Mb + m_2 i^2 (b + l'_0 c) + L_1 (b - l_0 c)}{Ma + m_1 b_{01}^2 + m_2 i^2 (a - l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)}; \quad (27)$$

$$\alpha_0 = \frac{k_4 + k_2 (b - l_0 c) + k_3 i^2 (b + l'_0 c)}{k_1 + k_2 (a + l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)}. \quad (27')$$

По заданным параметрам модельной задачи ($m_2 = 400$ кг, $l'_0 = 0.3$ м, $i = 1.4$) можно построить графики зависимости коэффициента связности α_0 от расстояния l_0 , определяемого по выражениям (27) и (27'), как это показано на рис. 5 [14].

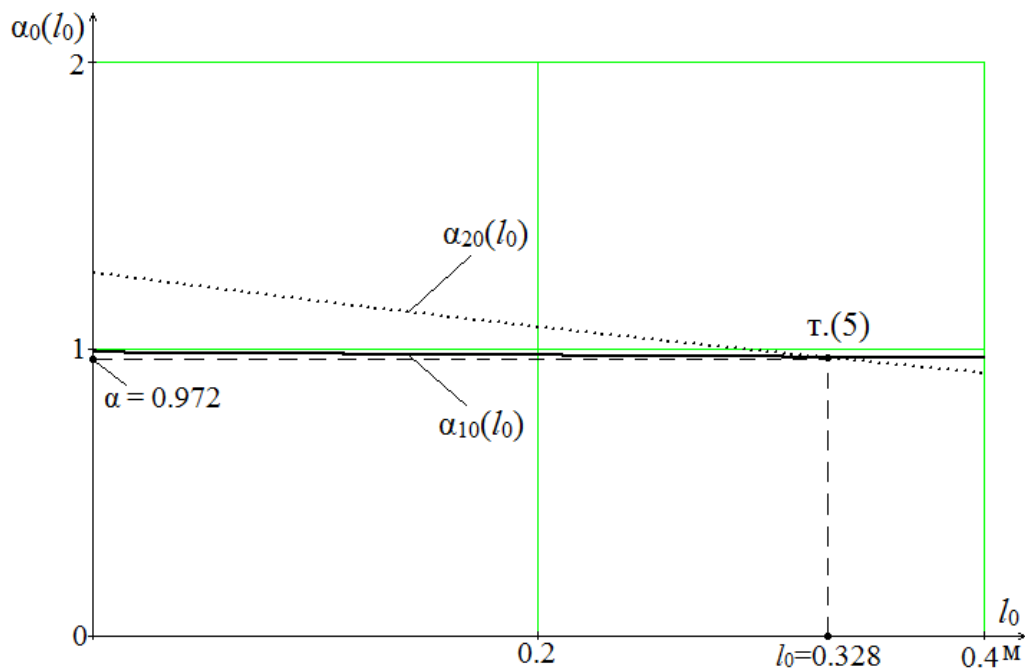


Рис. 5. График зависимости коэффициента связности α от l_0
Fig. 5. Graph of the connectivity coefficient α vs l_0

На рис. 5 приводятся: $\alpha_{10}(l_0)$ – график по выражению (27), и $\alpha_{20}(l_0)$ – график по выражению (27') соответственно. Точка пересечения двух графиков (т. (5)) показывает значение α_0 , при котором выполняется условие $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$. Амплитудно-частотные характеристики системы $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$,

$\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$ и $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$ с найденными параметрами приведены на рис. 6, 7.

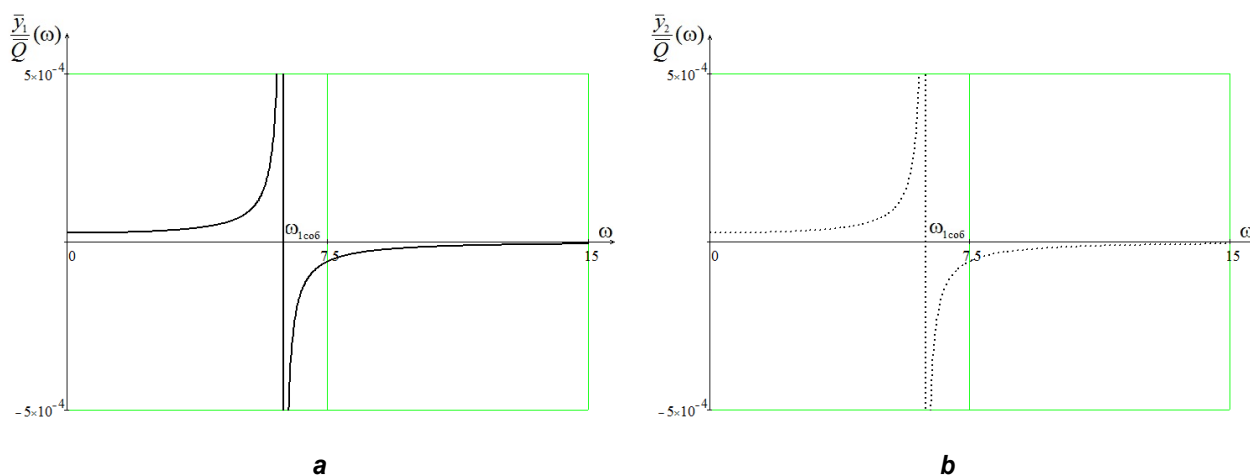


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики системы: а – $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$; б – $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$

Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of the system: а – $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$; б – $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$

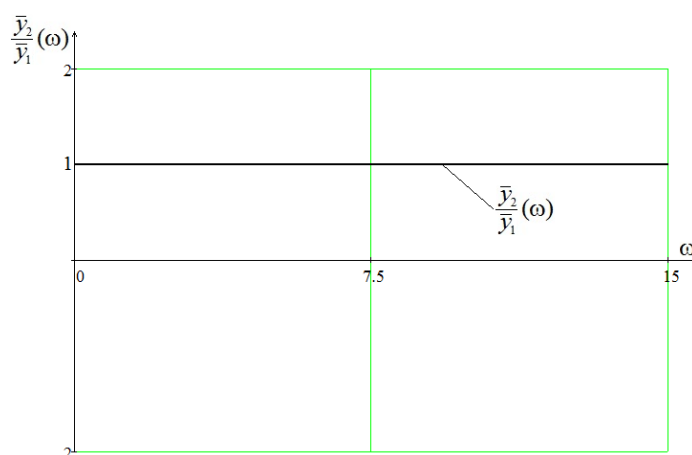


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики межпарциальной связи системы
 Fig. 7. Amplitude-frequency characteristics of interpartial ties of the system

Таким образом, при совместном действии двух настроечных параметров α_0 и l_0 можно получать систему, обладающую тем свойством, то при любой частоте внешних сил выполняется условие $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$.

Заключение

Многие технические системы технологического и транспортного назначения, расчетные схемы которых рассматриваются как механические колебательные системы с несколькими (чаще всего двумя) степенями свободы, которые на предварительных этапах исследований наделяются линейными свойствами, имеют сосредоточенные параметры и совершают малые колебания. Оценка и контроль динамических состояний подобных систем имеет большое значение в задачах обеспечения надежности машин и их динамического качества, что требует поиска и разработки соответствующих подходов, способов и средств управления формами динамических взаимодействий элементов системы.



В работе предлагается метод изменения динамических состояний технологических машин путем распределения амплитуд колебаний точек рабочих органов, связанных с особенностями реализации технологических процессов, осуществляемых в вибрационных полях определенной структуры. Показано, что в структуры механических колебательных систем могут быть введены механизмы, например, рычажного типа или других конструктивных форм, которыми могут быть созданы дополнительные связи, способствующие настройке вибрационных полей в нужных направлениях. Предложен и развит метод построения структурных математических моделей в виде структурных схем эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления. Введение понятия передаточных функций межпарциальных связей позволило создать методологические основы настройки и коррекции свойств однородного вибрационного поля, когда соответствующими мерами обеспечиваются движения системы с равными амплитудами (отношение амплитуд колебаний равно единице) на заданных частотах внешнего возмущения. Получены аналитические соотношения, определяющие возможности настроек и коррекции вибрационного поля.

Библиографический список

1. Clarence W. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
2. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of vibration protection. Switzerland: Springer, 2016. 708 p.
3. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. М.: Машиностроение, 1968. 362 с.
4. Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем. М.: Машиностроение, 1980. 276 с.
5. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука, 2011. 384 с.
6. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск: Наука, 2016. 459 с.
7. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2008. 523 с.
8. Хоменко А.П., Елисеев С.В., Артюнин А.И., Паршута Е.А., Каимов Е.В. Механизмы в упругих колебательных системах: особенности учета динамических свойств, задачи вибрационной защиты машин, приборов и оборудования. Иркутск, 2013. 187 с. Деп. в ВИНТИ РАН 15.08.2013. № 243. 2013.
9. Антипов В.И., Денцов Н.Н., Кошелев А.В. Динамика параметрически возбуждаемой вибрационной машины с изотропной упругой системой // Фундаментальные исследования. 2014. № 8. Ч. 5. С. 1037–1042.
10. Елисеев А.В., Выонг К.Ч. Некоторые возможности управления одномерным вибрационным полем технологической машины // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 33–41.
11. Каимов Е.В., Кириш Н.Ж., Миронов А.С. Формы связей между координатами при взаимодействиях элементов механических колебательных систем // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. № 20. С. 561–563.
12. Паршута Е.А., Миронов А.С. Упругие колебания механизмов. Математические модели в задачах вибрационной защиты // В сб.: математика, ее приложения и математическое образование (МПМО 14). V Междунар. конф. 2014. С. 263–266.
13. Выонг К.Ч. Возможности регулирования распределения амплитуд колебаний вибростенда // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 3 (59). С. 30–36.

References

1. Clarence W. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. 957 p.
2. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of vibration protection. Switzerland: Springer, 2016. 708 p.
3. Byikhovskiy I.I. *Osnovy teorii vibratsionnoy tekhniki* [Fundamentals of the theory of vibration engineering]. Moscow: Machine-Building Publ., 1968, 362 p. (In Russian).
4. Frolov K.V., Furman F.A. *Prikladnaya teoriya vibrozashitnykh system* [Applied theory of vibration protection systems]. Moscow: Machine-Building Publ., 1980, 276 p. (In Russian).
5. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. *Mekhatronnye podhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh system* [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical oscillatory systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2011, 384 p. (In Russ.).
6. Eliseev S.V., Artyunin A.I. *Prikladnaya teoriya kolebaniy v zadachah dinamiki lineynykh mekhanicheskikh system* [Applied theory of oscillations in the problems of linear mechanical system dynamics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2016, 459 p. (In Russ.).
7. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P., Zasyadko A.A. *Dinamicheskij sintez v obobshenykh zadachakh vibrozashity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob'ektov* [Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration insulation of engineering facilities]. Irkutsk: Irkutsk State University, 2008, 523 p. (In Russ.).

8. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Artyinin A.I., Parshuta E.A., Kaimov E.V. *Mekhanizmy v uprugikh kolebatel'nykh systemakh: osobennosti ucheta dinamicheskikh svoystvo, zadachi vibratsionnoi zashityi mashin, priborov i oborudovaniya* [Mechanisms in elastic oscillatory systems: features of dynamic properties, problems of vibration protection of machines, devices and equipment]. Irkutsk, 2013. 187 p. (In Russ.).
9. Antipov V.I., Dentsov N.N., Koshelev A.V. Dynamics of the parametrically excited vibrating machine with isotropic elastic system. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2014, no. 8 (5), pp. 1037–1042. (In Russ.).
10. Eliseev A.V., Vuong Q.T. The certain one dimensional vibratory field of technological machine control capabilities. *Sovremeniye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2016, no. 1 (49), pp. 33–41. (In Russ.).
11. Kaimov E.V., Kinash N.Zh., Mironov A.S. Forms of ties among the coordinates in the interaction elements of mechanical oscillatory system. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2016, vol. 1, no. 20, pp. 561–563. (In Russ.).
12. Parshuta E.A., Mironov A.S. Mechanism elastic oscillations. Mathematical models in the problems of vibration protection. *V sbornike: matematika, ee prilozheniya i matematicheskoe obrazovanie (MPMO 14). V mezhdunarodnaya konferentsiya* [In the collection of articles: mathematics, its applications and mathematical education (MAME 14). V international conference], 2014, pp. 263–266. (In Russ.).
13. Vuong Q.T. Possibilities of regulating the distribution of the oscillation amplitude of vibration table. *Sovremeniye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2018, no. 3, pp. 30–36. (In Russ.).

Критерии авторства

Вьонг Куанг Чык, Ковригина И.В., Елисеев С.В., Кибирев Ю.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Vuong Quang Truc, Kovrigina I.V., Eliseev S.V., Kibirev Yu.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вьонг Куанг Чык,
аспирант,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: trucvq1990@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vuong Quang Truc,
Post-graduate student of Irkutsk
State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russia;
e-mail: trucvq1990@gmail.com

Ковригина Инна Владимировна,
доцент, кандидат технических наук,
Забайкальский институт железнодорожного
транспорта ИргУПС,
672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11, Россия;
e-mail: innabella@mail.ru

Inna V. Kovrigina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Trans-Baikal
Institute of Railway Transport of Irkutsk State Transport
University,
11, Magistralnaya St., Chita 672040, Russia;
e-mail: innabella@mail.ru

Елисеев Сергей Викторович,
профессор, доктор технических наук,
директор Научно-образовательного центра
современных технологий, системного анализа
и моделирования,
Иркутский государственный университет путей
сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Sergey V. Eliseev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director
of the Scientific and Educational Center of Modern
Technologies, System Analysis and Modeling
of Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russia;
e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Кибирев Юрий Владимирович,
аспирант, главный инженер, первый заместитель
генерального директора,
АО «Труд»,
664017, г. Иркутск, ул. Академическая, 5 а, Россия;
e-mail: kibirev@zaotrud.ru

Yuri V. Kibirev,
Post-graduate student, Chief Engineer, first Deputy General
Director of "Trud" JSC,
Akademicheskaya St., 5 a, Irkutsk, 664017, Russia;
e-mail: kibirev@zaotrud.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 625. 514

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-237-245>

Математическая модель регулятора аксиально-поршневого насоса на примере HPV102GW-RH23A фирмы «Hitachi»

© В.Г. Зедгенизов, А.Н. Стрельников, Д.С. Бирюков

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – разработать математическую модель регулятора аксиально-поршневого насоса HPV102GW-RH23A фирмы Hitachi для определения влияния параметров регулятора на выходные характеристики насоса; математическое моделирование рабочего процесса регулятора. Разработана математическая модель регулятора, предложена схема ее решения в среде «Matlab-Simulink», определены перемещения золотника (x_1), сервопоршня (x_3) и изменение давления со стороны большой площади сервопоршня (p_3) во времени при номинальном давлении в системе и при $p > p_{ном}$, получена зависимость перемещения сервопоршня (x_3) от жесткости пружины золотника. Разработанная математическая модель регулятора дает возможность установить причины неисправностей в работе регулируемого аксиально-поршневого насоса. Так, при увеличении жесткости пружины золотника 1 на величину 5000 Н/м перемещение сервопоршня, а, следовательно, и подача насоса уменьшаются на 20%. Это приводит к снижению загрузки двигателя базовой машины и потере производительности экскаватора в целом. Увеличение суммарной жесткости пружин золотника 6 по сравнению с паспортными данными может привести к перегрузке двигателя экскаватора вплоть до полного его останова.

Ключевые слова: объемный гидропривод, регулируемый аксиально-поршневой насос, регулятор

Информация о статье: Дата поступления 22 января 2019 г.; дата принятия к печати 21 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Зедгенизов В.Г., Стрельников А.Н., Бирюков Д.С. Математическая модель регулятора аксиально-поршневого насоса на примере HPV102GW-RH23A фирмы «Hitachi». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 237–245. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-237-245.

A mathematical model of the axial piston pump controller on example of Hitachi HPV102GW-RH23A

Viktor G. Zedgenizov, Alexander N. Strelnikov, Dmitry S. Biryukov

National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to develop a mathematical model of the controller of the axial piston pump Hitachi HPV102GW-RH23A to determine the influence of controller parameters on pump output characteristics and carry out the mathematical modeling of controller operation. The mathematical model of the controller is developed. Its solution scheme in Matlab-Simulink is proposed. Displacements of the spool (x_1), servo piston (x_3) are determined as well as changes in the pressure from a large area of the servo piston (p_3) in time at a nominal pressure in the system and when $p > p_{nom}$. The dependence of the servo piston displacement (x_3) on the spool spring stiffness is obtained. The developed mathematical model of the controller allows to find out the causes of malfunctions in the operation of the adjustable axial piston pump. Thus, an increase in the stiffness of the spool 1 spring by 5000 N/m decreases the servo piston displacement and, consequently, the pump flow by 20%. This reduces the load of the basic machine engine and causes the loss of excavator performance as a whole. The increase in the total stiffness of the springs of spool 6 in comparison with the nameplate data can lead to an overload of the excavator engine up to its complete stop.

Keywords: fluid power drive, adjustable axial piston pump, controller

Information about the article: Received January 22, 2019; accepted for publication March 21, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Zedgenizov V.G., Strelnikov A.N., Biryukov D.S. A mathematical model of the axial piston pump controller on example of Hitachi HPV102GW-RH23A. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 237–245. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-237-245.

Введение

Современные тенденции развития строительного гидропривода предполагают повышение его эффективности за счет применения объемных регулируемых машин с гидравлическим управлением [1–4]. Это высокотехнологичные комплексы, включающие в себя силовую часть и систему управления подачей насоса, дальнейшее развитие которых, безусловно, связано с моделированием. Проведение прямого эксперимента на натурных образцах требует больших затрат времени и материальных средств, а область исследований зачастую ограничена техническими возможностями экспериментального образца. Моделирование, как метод научных исследований, обладает, с одной стороны достаточной достоверностью результатов, с другой – значительным сокращением затрат по сравнению с экспериментом на натурном образце. Поэтому разработка математической модели регулятора аксиально-поршневого насоса с целью определения влияния параметров регулятора на выходные характеристики насоса является актуальной задачей.

В качестве объекта исследования выбран двухсекционный регулируемый аксиально-поршневой насос HPV102GW-RH23A фирмы Hitachi с регулятором на каждой секции.

Регулятор насоса выполняет следующие функции [5].

1. Управление подачей насоса с помощью джойстика. При воздействии на джойстик клапан в гидрораспределителе задает давление P_i , которое поступает на регулятор. В свою очередь регулятор изменяет подачу насоса пропорционально поданному давлению. Когда джойстик возвращается в исходное положение, давление P_i уменьшается, что приводит к уменьшению подачи насоса (рис. 1 а).

2. Изменение подачи в зависимости от давления на выходе секций насоса. На регулятор подается давление P_{d1} и давление P_{d2} в качестве сигнала от секций насоса. Если их суммарное давление выходит за пределы характеристики $P - Q$ (давление-подача), на которую настроен регулятор, он уменьшает подачу обеих секций таким образом, что суммарная подача насоса возвращается на линию настройки характеристики $P - Q$. Таким образом, осуществляется защита двигателя от перегрузки. Характеристика $P - Q$ служит для совместного регулирования работы обеих секций. Несмотря на то, что секции, обслуживающие разные контуры, нагружены не одинаково, их суммарная мощность соответствует мощности двигателя (рис. 1 б).

3. Изменение подачи насоса от сигнала электромагнитного клапана управления крутящим моментом ДВС. Основной контроллер МС получает данные заданной и фактической частоты вращения двигателя и подает сигнал на электромагнитный клапан управления крутящим моментом. Последний подает на регулятор давление управления крутящим моментом P_{ps} , который уменьшает подачу насоса (рис. 1 с).

4. Управление подачей от электромагнитного клапана (только контур секции 2). Когда на основной контроллер МС приходят сигналы от переключателя режима работы, от датчика давления или от переключателя режима рабочего оборудования, он направляет сигнал на электромагнитный клапан, который уменьшает давление управления насосом P_i , ограничивая максимальную подачу насоса (рис. 1 д).

На рис. 2 представлена расчетная схема регулятора.

Регулятор работает следующим образом. Управление подачей с помощью джойстика. При воздействии на джойстик увеличивается давление P_i . Поршень 4, преодолевая сопротивление пружины 1, перемещает золотник 3 в левую сторону. При этом канал большой полости сервопоршня 10 открывается на слив в гидробак. Давление системы управления P_g постоянно действует на сервопоршень 10 со стороны малой полости, и под действием разности давлений сервопоршень 10 смещается в том же направлении. В результате блок цилиндров отклоняется в сторону максимального наклона, увеличивая подачу насоса.

Одновременно блок цилиндров через систему рычагов 12 смещает гильзу 2 в направлении перемещения золотника 3. Когда гильза 2 сместится на такую же величину, как и золотник 3, канал слива в гидробак из большой полости сервопоршня перекрывается, сервопоршень 10 останавливается и увеличение подачи прекращается.

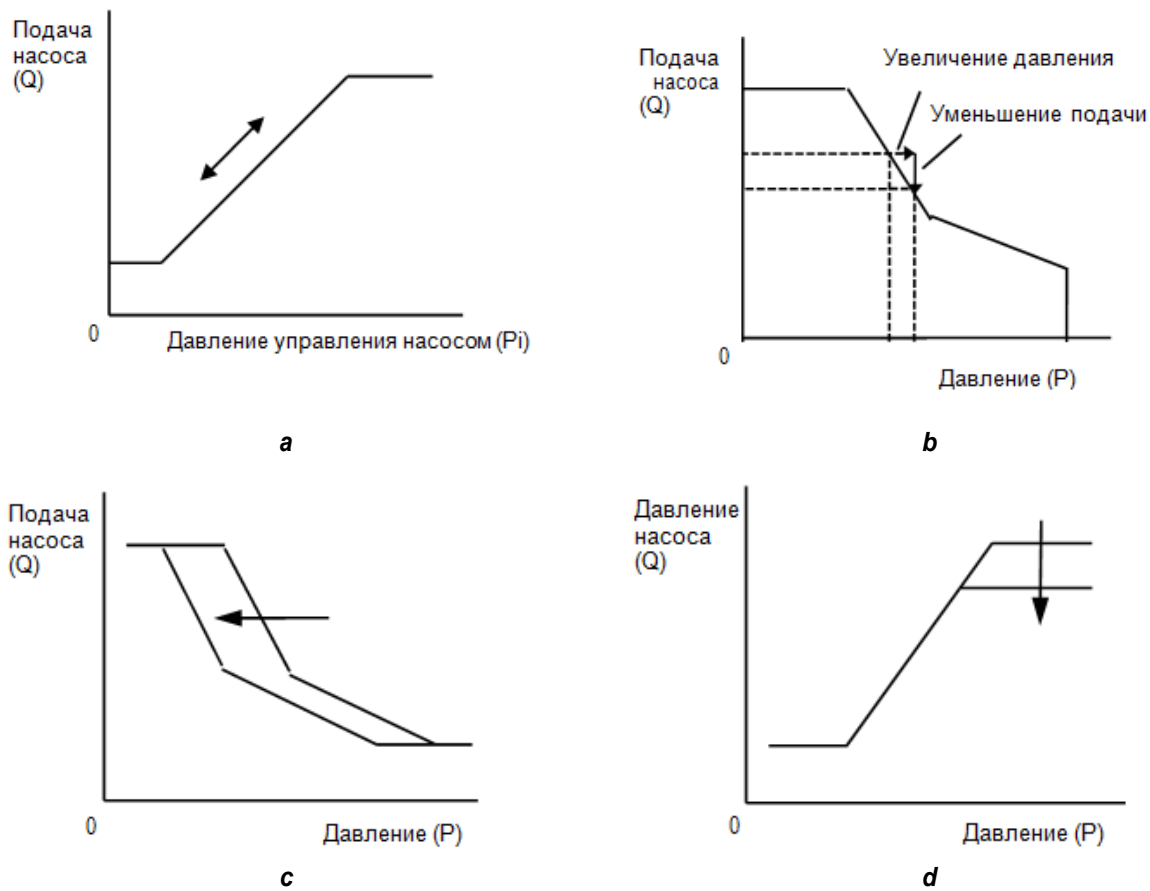


Рис. 1. Функции регулятора: а – управление подачей с помощью джойстика; б – изменение подачи в зависимости от давления на выходе секций насоса; с – изменение подачи насоса от сигнала электромагнитного клапана управления крутящим моментом ДВС; d – управление подачей от электромагнитного клапана
Fig. 1. Controller functions: a – joystick control of flow; b – flow variation depending on the pressure at the pump section outlet; c – pump flow variation depending on the signal of the electromagnetic ICE torque control valve; d – control of flow from the solenoid valve

Уменьшение подачи происходит при воздействии на рычаг управления в обратном направлении. При этом уменьшается давление P_i , на золотник 3 и поршень 4 действует усилие пружины 1 и заставляет их смещаться в правую сторону. При этом давление управления P_g подается в большую полость сервопоршня 10. За счет разности площадей большой и малой полости сервопоршень 10 также смещается вправо, и блок цилиндров отклоняется в сторону минимального наклона, уменьшая подачу насоса.

Одновременно блок цилиндров через систему рычагов 12 смещает гильзу 2 в том же направлении, что и золотник 3. Когда гильза сместится на такую же величину, как и золотник 3, канал к сервопоршню 10 через гильзу 2 и золотник 3 перекрывается, сервопоршень останавливается, и уменьшение подачи прекращается.

Изменение подачи в зависимости от давления на выходе секций насоса. При воздействии на любой рычаг управления экскаватора насос нагружается, увеличивается давление на выходе секции 1 (P_{d1}) или секции 2 (P_{d2}). Поршень нагрузки 5, сжимая внутреннюю и наружную пружины 8 и 9, смещает золотник 6 в правую сторону. Смещаясь, золотник 6 подает давление управления P_g в малую полость сервопоршня 10. За счет разности площадей большой и малой полостей сервопоршень 10 также смещается вправо, отклоняет блок цилиндров в сторону минимального наклона, уменьшая подачу насоса.

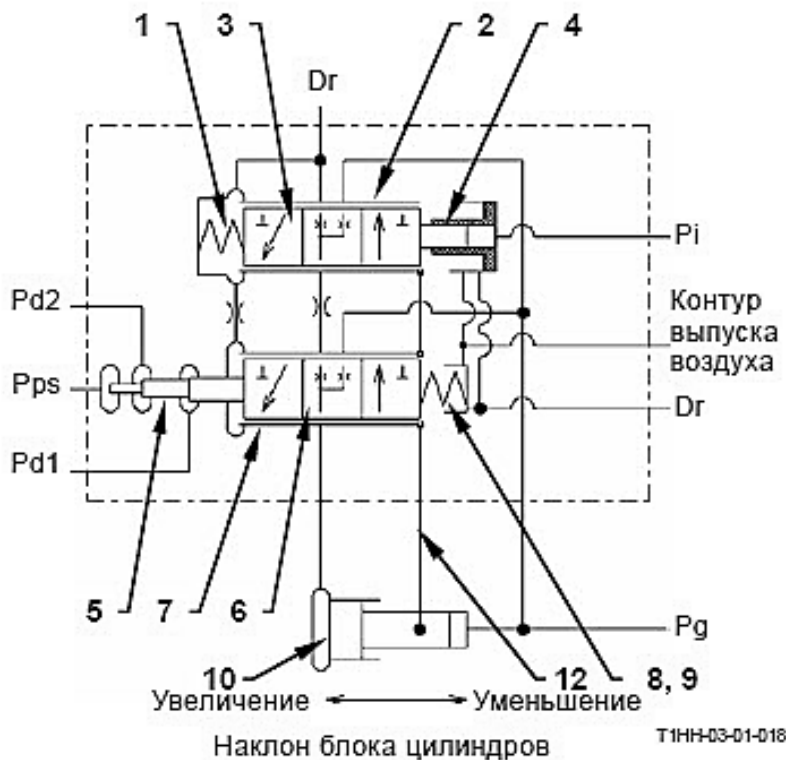


Рис. 2. Расчетная схема регулятора:

Fig. 2. Controller design scheme: $Pd1$ – section 1 flow pressure; $Pd2$ – section 2 flow pressure; Pi – pressure of the manual control of the pump; Pps – control pressure of ICE torque; Dr – return to hydraulic tank; Pg – initial control pressure from the control system pump

Одновременно блок цилиндров через систему рычагов 12 смещает гильзу 7 в том же направлении, в котором движется золотник 6. Когда гильза сместится на такую же величину, как и золотник 6, канал к сервопоршню 10 через гильзу 7 и золотник 6 перекрывается, сервопоршень 10 останавливается, уменьшение подачи прекращается.

Когда нагрузка на насос ослабляется, уменьшаются давления P_{d1} или P_{d2} . Поршень нагрузки 5 и золотник 6 под действием внутренней и наружной пружин 8 и 9 смещаются влево. Смещаясь, золотник 6 открывает канал слива из большой полости сервопоршня 10 в гидробак. Поскольку давление управления постоянно подается в малую полость сервопоршня 10, то под разностью давлений сервопоршень 10 также смещается влево. Таким образом, блок цилиндров отклоняется в сторону максимального наклона, увеличивая подачу насоса.

Одновременно блок цилиндров через систему рычагов 12 смещает гильзу 7 в том же направлении, что и золотник 6. Как только гильза 7 сместится на такую же величину, как и золотник 6, канал к сервопоршню 10 через гильзу 7 и золотник 6 перекрывается, сервопоршень 10 останавливается и увеличение подачи прекращается.

Изменение подачи насоса от сигнала электромагнитного клапана управления крутящим моментом ДВС. При увеличении давления управления крутящим моментом P_{ps} оно суммируется с давлениями P_{d1} и P_{d2} и действует на поршень нагрузки 5. Далее процесс регулирования происходит так же, как при изменении подачи давлением на выходе секций насоса.

Разработке математических моделей объемного гидропривода посвящены работы многих авторов [6–12]. Опираясь на выполненные исследования, работа регулятора может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений:



$$\left. \begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} &= P_i S_1 - c_1 x_1 - k \frac{dx_1}{dt} \\ k_1 \frac{dp_3}{dt} &= S_2 \frac{dx_3}{dt} - \mu b (x_1 - x_3) \sqrt{\frac{2p_3}{\rho}} \end{aligned} \right\} \text{при } p \leq p_{\text{ном}}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} &= F - c_2 x_2 - k \frac{dx_2}{dt} \\ k_1 \frac{dp_3}{dt} &= S_2 \frac{dx_2}{dt} - \mu b (x_2 - x_3) \sqrt{\frac{2p_3}{\rho}} \end{aligned} \right\} \text{при } p > p_{\text{ном}}; \quad (2)$$

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = p_3 S_3 - P_g S_2 - k \frac{dx_3}{dt}, \quad (3)$$

где m_1 – приведенная масса золотника 1, кг; x_1 – перемещение золотника 1, м; P_i – давление ручного управления насосом, Па; S_1 – площадь поперечного сечения поршня 4, м²; c_1 – жесткость пружины 1, Н/м; k – коэффициент «жидкостного» трения, Нс/м; k_1 – коэффициент упругости рабочей жидкости и материала стенок регулятора; S_2 – меньшая площадь поперечного сечения сервопоршня, м²; μ – коэффициент, зависящий от формы проходного сечения; b – высота проходного сечения, м; ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³; m_2 – приведенная масса золотника 6, кг; x_2 – перемещение золотника 6, м; F – суммарное усилие со стороны поршня нагрузки 5, Н; c_2 – суммарная жесткость пружин 8 и 9, Н/м; m_3 – приведенная масса сервопоршня 10, кг; x_3 – перемещение сервопоршня 10, м; p_3 – давление со стороны большой площади сервопоршня 10, Па; S_3 – большая площадь поперечного сечения сервопоршня 10, м²; P_g – постоянное давление управления, Па; $p_{\text{ном}}$ – номинальное давление в системе, Па.

При составлении математической модели были приняты следующие допущения:

- рабочая жидкость имеет постоянные параметры;
- сопротивление движущихся частей учитывается коэффициентом «жидкостного» трения;
- характеристики пружин линейны.

Уравнения (1) характеризуют перемещение золотника 1 и изменение давления в большой полости сервопоршня 10 при номинальном режиме работы, уравнения (2) – тоже при давлении в системе $p > p_{\text{ном}}$. Уравнение (3) определяет перемещение сервопоршня 10.

Для решения системы уравнений в среде «Matlab-Simulink» разработана схема, которая представлена на рис. 3 [13].

Цепочка блоков 11–39 имитирует решение уравнений (1), блоки 42–50 – уравнения (3), а блоки 24–33 – уравнение (2). Результаты решения выводятся на блок 53.

На рис. 4 представлены результаты моделирования: перемещения золотника 1 (x_1), сервопоршня 10 (x_3) и изменение давления со стороны большой площади сервопоршня (p_3) во времени при номинальном давлении в системе (рис. 3 а) и при $p > p_{\text{ном}}$ (рис. 3 б).

При номинальном давлении в начальный момент времени золотник и сервопоршень находятся в нулевом положении, давление – на уровне 2 МПа. При подаче давления $P_i = 1$ МПа золотник начинает перемещаться и приблизительно через 0,05 с достигает своего крайнего положения (0,005 м), соединяя полость со стороны большой площади сервопоршня со сливной магистралью. В результате давление p_3 начинает падать и, под действием разницы давлений на торцах сервопоршня, последний перемещается вслед за золотником.

Одновременно с перемещением сервопоршня приходит в движение гильза регулятора, которая постепенно перекрывает сливную магистраль. Через 0,2 с давление вновь начинает

возрастать и стабилизируется на первоначальном уровне (2 МПа). В результате движение сервопоршня замедляется, и последний останавливается на отметке 0,005 м, т.е. перемещается ровно настолько, насколько переместился золотник (рис. 3 а).

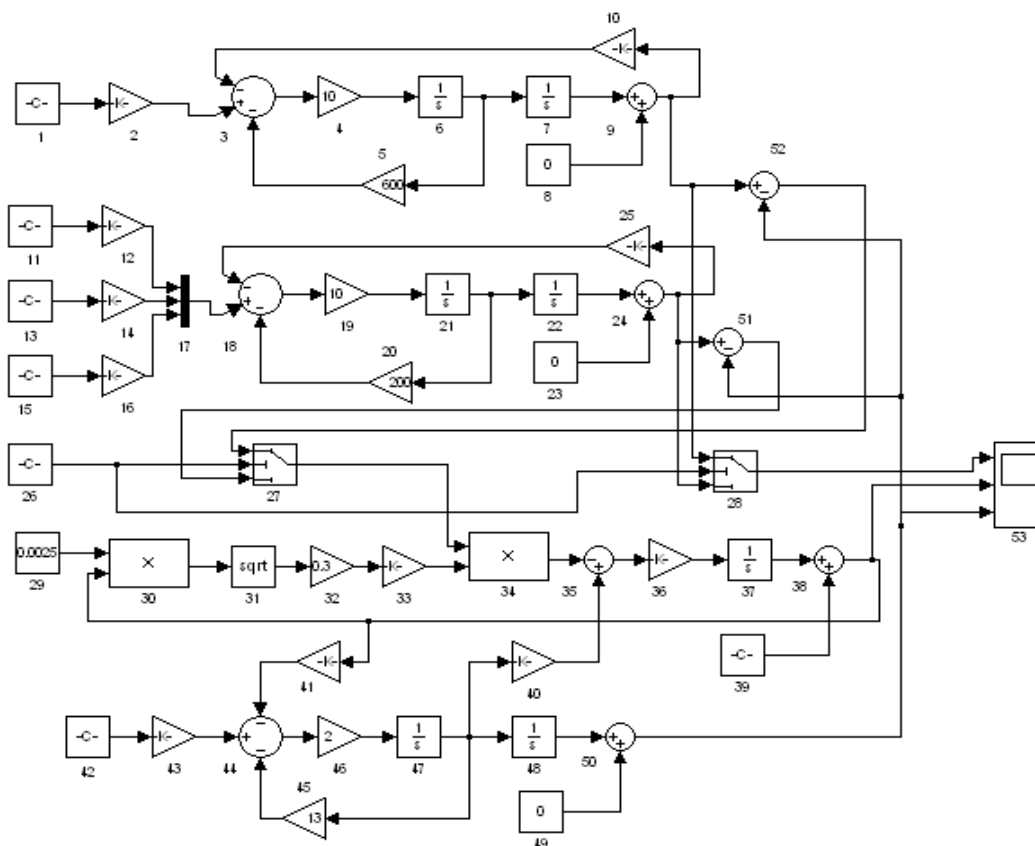


Рис. 3. Схема решения в «Matlab-Simulink»
 Fig. 3. Solution scheme in Matlab-Simulink

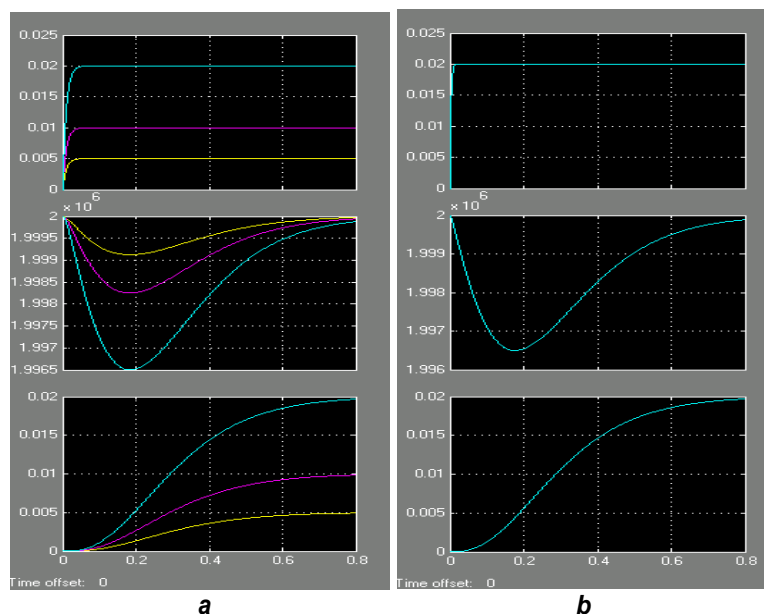


Рис. 4. Результаты моделирования в «Matlab-Simulink»
 Fig. 4. Matlab-Simulink simulation results



При подаче давления $P_i = 2$ МПа и $P_i = 4$ МПа золотник перемещается на уже на 0,01 м и на 0,02 м, соответственно, и вслед за ним через 0,8 с на такие же расстояния перемещается сервопоршень.

Если давление на выходе секций насоса превышает номинальное, то (независимо от положения золотника 3) в работу вступает золотник 6 и уменьшает подачу насоса.

Разработанная математическая модель регулятора дает возможность установить причины неисправностей в работе регулируемого аксиально-поршневого насоса. Так, например, при увеличении жесткости пружины 1 золотника 3 на величину 5000 Н/м перемещение сервопоршня 10, а, следовательно, и подача насоса уменьшается на 20%. Это приводит к снижению загрузки двигателя и потере производительности экскаватора в целом (рис. 5).

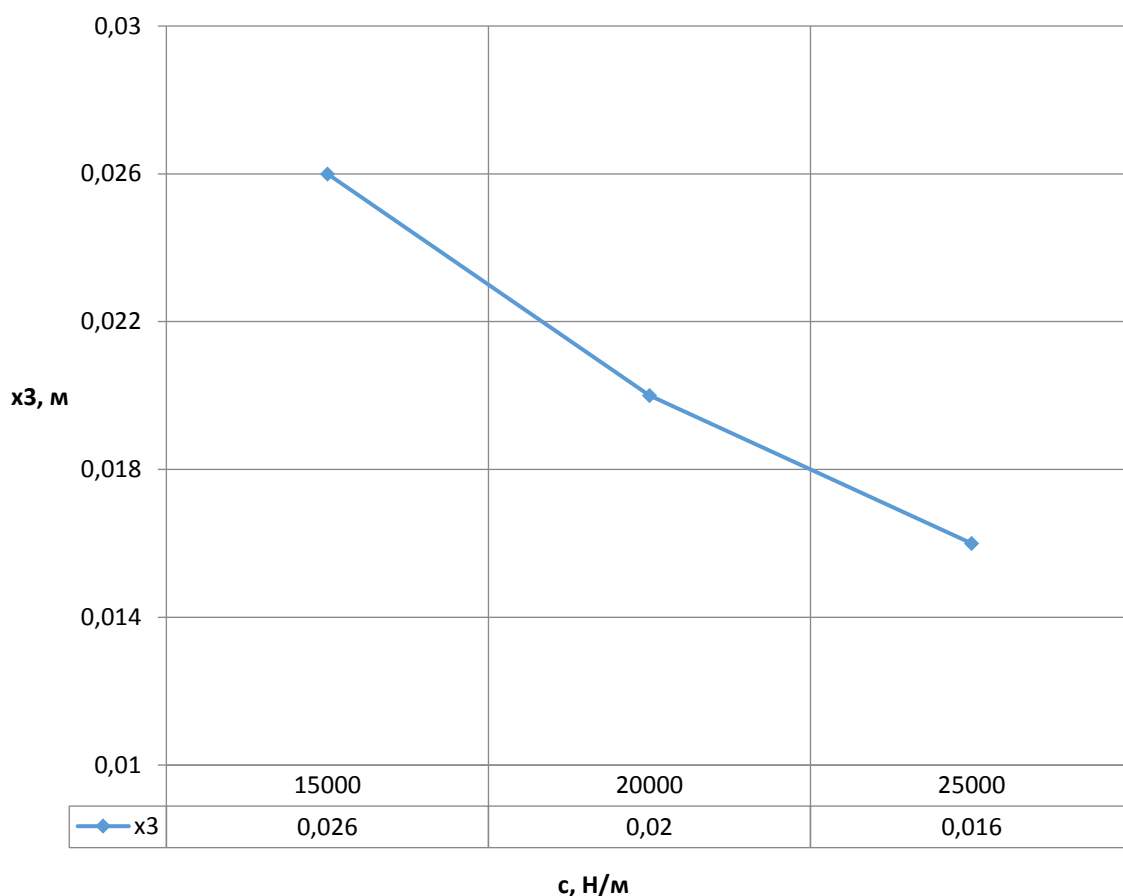


Рис. 5. Зависимость перемещения сервопоршня (x_3) от жесткости пружины 1 золотника 3
Fig. 5. Dependence of the servo piston displacement (x_3) on the stiffness of the spring 1 of the spool 3

Увеличение суммарной жесткости пружин 8 и 9 золотника 6 (по сравнению с паспортными данными) может привести к перегрузке двигателя экскаватора вплоть до полного его останова.

Заключение

Разработанная математическая модель адекватно описывает рабочий процесс регулятора аксиально-поршневого насоса с гидравлическим управлением и может быть использована при разработке методики диагностирования регулируемых аксиально-поршневых насосов с гидравлическим управлением.

Библиографический список

1. Иванов Г.М., Свешников В.К. Основные направления развития современного гидропривода // Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка. 2013. № 4. С. 32–35.
2. Васильченко В.А., Соболев В.О. Регуляторы расхода рабочей жидкости для гидроприводов мобильных машин // Строительные и дорожные машины. 2007. № 12. С. 26–28.
3. Васильченко В.А., Шекунов А.К. Современные достижения в гидроприводе и их применение в машиностроении // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 86–95.
4. Свешников В.К. Станочные гидроприводы. М.: Машиностроение, 2008. 640 с.
5. Техническое руководство (принципы работы). Экскаватор Zaxis 200, 225USR, 225US, 230-270. HITACHI, 2014 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/908911/> (дата обращения: 06.12.2018).
6. Башта Т.М. Гидропривод и гидropневмоавтоматика. М.: Машиностроение, 1972. 320 с.
7. Математическое моделирование процесса диагностирования аксиально-поршневого гидронасоса с регулятором мощности. Зедгенизов В.Г., Стрельников А.Н., Коломиец А.Н. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2007. № 4 (32). С. 64–67.
8. Бойко В.Д., Андреев М.А., Семенов С.Е. Особенности верификации математической модели регулятора аксиально-поршневого насоса с электрогидравлическим управлением // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Инженерный вестник. 2014. № 12.
9. Стасенко Д.Л., Петоченко М.И. Влияние конструктивных особенностей регулятора насоса с адаптацией к нагрузке на его быстродействие // Актуальные вопросы машиноведения. 2017. Т. 6. С. 86–89.
10. Регуляторы гидронасосов с переменным рабочим объемом [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://cdmteh.ru/regulatori_gidronasosov.html (дата обращения: 15.01.2019).
11. Андреев М.А., Семенов С.Е. Коррекция динамических характеристик регулятора аксиально-поршневого насоса с электрогидравлическим пропорциональным управлением // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 12. С. 47–54. DOI: 10.7463/0113.0516044
12. Прокофьев В.Н., Данилов Ю.А. Аксиально-поршневой регулируемый гидропривод. М.: Машиностроение, 1969. 496 с.
13. Axin M., Eriksson B. Flow versus pressure control of pumps in mobile hydraulic systems // Journal of system and control engineering. 2014. Vol. 4 (228). P. 245–256.
14. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. 288 с.

References

1. Ivanov G.M., Sveshnikov V.K. The main directions of development of modern hydraulic drive *Oborudovaniye i instrument dlya professionalov* [Equipment and tools for professionals. Metalworking], 2013, no. 4, pp. 32–35. (In Russ.).
2. V.A. Vasil'chenko, V. O. Sobolev Regulators of an expense of working liquid for hydraulic drives of mobile cars *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road building machinery], 2007, no. 12, pp. 26–28. (In Russ.).
3. Vasil'chenko V.A., Shekunov A.K. Recent advances in the hydraulic circuit and its application in engineering *Vestnik mashinostroyeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2008, no. 7, pp. 86–95. (In Russ.).
4. Sveshnikov V.K. *Stanochnyye gidroprivody* [Machine Hydraulic Actuators]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008. 640 p. (In Russ.).
5. *Tekhnicheskoe rukovodstvo* [Engineering guidance (operation principles)]. URL: <https://www.twirpx.com/file/908911/> (available at: 6 December 2018).
6. Bashta T.M. *Gidroprivod i gidropnevmoavtomatika* [Hydraulic drive and hydropneumatic automation]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1972, 320 p. (In Russ.).
7. Bojko V.D., Andreev M.A., Semenov S.E. Verification features of the mathematical model of the controller of the axial piston pump with an electro-hydraulic control. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman. Inzhenernyy vestnik* [Scientific edition of Bauman MSTU. Science and Education. Engineering Bulletin], 2014, no. 12. (In Russ.).
8. Stasenko D.L., Petochenko M.I. Influence of design features of the pump regulator with adaptation to loading on its performance. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya*, 2017, vol. 6, pp. 86–89. (In Russ.).
9. *Regulyatory gidronasosov s peremennym rabochim ob'emom* [Regulators of hydraulic pumps with variable displacement]. URL: http://cdmteh.ru/regulatori_gidronasosov.html (accessed: 15 January 2019).
10. Andreev M.A., Semenov S.E. Correction of regulator's dynamic characteristics in axial piston pump with electric proportional control. *Nauka i obrazovanie, MGTU im. N.E. Bauman. Elektron. zhurn.* [Scientific edition of Bauman MSTU. Science and Education. Electronic Journal] 2012, no. 12, pp. 47–54. DOI: 10.7463/0113.0516044
11. Prokof'ev V.N., Danilov Yu. A. *Aksial'no-porshnevoi reguliruemyy gidroprivod* [Axial piston adjustable hydraulic drive]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 1969, 496 p. (In Russ.).
12. Axin M., Ericsson B. Flow versus pressure control of pumps in mobile hydraulic systems. *Journal of system and control engineering*, 2014, vol. 4 (228), pp. 245–256.
13. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink] Moscow: DМК Press Publ., 2008, 288 p. (In Russ.).



Критерии авторства

Зедгенизов В.Г., Стрельников А.Н., Бирюков Д.С. разработали математическую модель регулятора аксиально-поршневого насоса HPV102GW-RH23A фирмы Hitachi для определения влияния параметров регулятора на выходные характеристики насоса. Авторы получили и оформили научные результаты, несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зедгенизов Виктор Георгиевич,

доктор технических наук,
профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: vigez@istu.edu

Стрельников Александр Николаевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: v03@istu.edu

Бирюков Дмитрий Сергеевич,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: Biryukov@istu.edu

Authorship criteria

Zedgenizov V.G., Strelnikov A.N., Biryukov D.S. have developed a mathematical model of the controller of the axial piston pump Hitachi HPV102GW-RH23A to determine the effect of the controller parameters on the output characteristics of the pump. The authors obtained and formalized the scientific results and bear the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor G. Zedgenizov,

Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Hydraulic Systems,
National Research Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; e-mail: vigez@istu.edu

Alexander N. Strelnikov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Hydraulic Systems, National Research Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: v03@istu.edu

Dmitry S. Biryukov,

Postgraduate Student,
National Research Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: Biryukov@istu.edu



Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента за счет нанесения покрытий

© Б.Я. Мокрицкий, Э.С. Ситамов, А.Г. Серебренникова

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

Резюме: Целью работы является выбор наиболее рационального покрытия для заданных условий эксплуатации металлорежущего инструмента. Рациональность оценена по времени работы до достижения износа по задней поверхности не более 0,5 мм. Проведено исследование влияния покрытий на износостойкость твердосплавных сменных пластин токарных резцов при наружной обработке заготовок деталей, выполненных из нержавеющей специализированной труднообрабатываемой стали марки 09X17H7Ю. Область применения этой стали существенно расширилась, а рекомендации по ее обработке устарели. В качестве базы для отсчета рациональности принято время работы отечественных твердосплавных пластин, выполненных из сплава марки ВК8. Рассмотрены только квадратные сменные твердосплавные пластины с центральным базирующим отверстием, длина стороны квадрата 12,7 мм. Необходимость исследования вызвана тем, что имевшиеся ранее рекомендации по режимам обработки и по выбору инструментального материала для такой обработки указанной нержавеющей стали физически устарели (отсутствуют станки тех моделей и инструментальные материалы), требуются новые рекомендации для современных условий. Использован экспериментальный метод исследования работоспособности различных инструментальных материалов (субстрат ВК8 + то или иное покрытие) путем оценки прироста во времени величины износа инструмента по задней поверхности. Для заданных условий эксплуатации создан задел для формирования базы данных по подбору режимов резания и инструментальных материалов. Показано влияние выбора покрытия на прирост износостойкости инструмента. В результате выявлены предпочтительные покрытия, позволяющие вести длительную обработку без замены режущей кромки. Установлено, что рассмотренные инструментальные материалы существенно неравноценны по износостойкости; предпочтительным инструментальным материалом является ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм), в котором нанесение слоев покрытия осуществлено методом конденсации ионной бомбардировкой с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами.

Ключевые слова: точение, нержавеющая сталь, износостойкость, твердосплавный инструмент, покрытие

Информация о статье: Дата поступления 4 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С., Серебренникова А.Г. Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента за счет нанесения покрытий. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 246–251. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-246-251.

Improving carbide cutting tool performance through coating

Boris Ya. Mokritskiy, Eradzh S. Sitamov, Andzhela G. Serebrennikova

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

Abstract: The purpose of the work is to choose the most rational coating for the specified operating conditions of the metal-cutting tool. The rationality is estimated by the operation time until the rear surface wear becomes less than 0.5 mm. The study is given to the influence of coatings on wear resistance of carbide replaceable inserts of turning cutters at the external machining of billets made of stainless specialized hard-working steel of grade 09X17H7Ю. The application field of this steel has expanded considerably, while the recommendations for its machining are outdated. As a benchmark for rationality calculation is taken the operation time of domestic carbide plates made of VK8 grade alloy. Consideration is given only to square replaceable carbide inserts with a central base hole, the side length of a square is 12.7 mm. The need for the study is determined by the fact that available recommendations on the processing modes and choice of tool material for this treatment of the specified stainless steel are physically outdated (there are no machines of those models and tool materials). New recommendations are required for modern conditions. An experimental method is used to study the performance of various tool materials (VK8 substrate + a particular coating) by estimating the increase in the amount of tool wear on the rear surface over the time. For the specified operating conditions, a reserve has been created to form a database for the

selection of cutting modes and tool materials. The influence of the choice of coating on the increase in tool wear resistance is shown. As a result, the preferred coatings that allow to conduct a lasting processing without cutting edge replacement have been identified. It is determined that the considered tool materials are substantially unequal by their wear resistance. The preferred tool material is VK8 + Ti(up to 1 μm) + TiN(1 μm) + (NbZrTiAl)N(2.5 μm) in which the coating layers are applied by condensation by ion bombardment with droplet filtration and assisting accelerated ions.

Keywords: turning, stainless steel, wear resistance, carbide tool, coating

Information about the article: Received February 4, 2019; accepted for publication March 12, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Mokritskiy B.Ya., Sitamov E.S., Serebrennikova A.G. Improving carbide cutting tool performance through coating. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 246–251. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-246-251.

Введение

Сталь марки 09Х17Н7Ю разработана в начале XX в. (ранее обозначалась 09Х17Н7Ю1) как специализированная, судостроительная, высококоррозионная, нержавеющая. Разработанные тогда рекомендации по режимам ее обработки и по применению металлорежущего инструмента сейчас неприменимы физически в силу того, что уже не выпускаются инструментальные материалы и металлорежущее оборудование прежнего стандарта. А области применения этой стали существенно расширились (медицина, пищевая промышленность, нефтепереработка и т.д.). Встала задача о разработке новых рекомендаций применительно к сегодняшним условиям эксплуатации, о создании банка справочных данных

для этих условий по режимам резания, инструментальным материалам и т.д.

Состав стали [1] указан в табл. 1.

Часть физико-механических характеристик приведена в табл. 2.

Специфика свойств этой стали создает сложности [2] при ее механической обработке лезвийным металлорежущим инструментом.

Очевидно, это связано с тем, что прямого аналога данной нержавеющей стали за рубежом нет, в силу этого и нельзя применять имеющиеся обобщенные рекомендации.

Концептуально нами поставлена задача применить отечественный твердосплавный инструментальный материал и повысить его работоспособность за счет

Таблица 1

Химический состав стали марки 09Х17Н7Ю, %

Table 1

Chemical composition of steel of 09Х17Н7Ю grade, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Al
до 0,09	до 0,8	до 0,08	7–8	до 0,02	до 0,03	16–17,5	0,5–0,8

Таблица 2

Физико-механические характеристики стали марки 09Х17Н7Ю

Table 2

Physico-mechanical characteristics of steel of 09Х17Н7Ю grade

Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение при разрыве δ_5 , %	Ударная вязкость КСУ, кДж / м ²	Термообработка
830	735	12	490	Закалка и высокий отпуск



применения современных покрытий. В силу этого в качестве субстрата применен твердый сплав марки ВК8, производимый АО «Кировградский завод твердых сплавов» (Свердловская область). В качестве покры-

тий для этого субстрата принято несколько вариантов многослойных наноструктурированных покрытий [3–5] со специальными технологиями их осаждения и архитектурования [6–9].

Методология исследования

Рассмотрено наружное точение проходными резцами с механическим креплением режущих пластин. Использованы четырехгранные квадратные пластины с центральным крепежным отверстием [10]. Вариант исполнения пластин: класс допусков U, обозначение 03114-120408 (SNUM - 120408), длина стороны и диаметр вписанной окружности равны 12,7 мм, толщина 4,76 мм, диаметр отверстия 5,16 мм.

Скорость резания поддерживали в пределах 50–55 м/мин за счет варьирования числа оборотов шпинделя. Использовали токарно-винторезный станок модели 16К25.

Подача резца из требований шероховатости обрабатываемой поверхности выбрана равной 0,21 мм/об. заг. Глубину резания принимали равной 0,5 мм (для условий чистовой обработки). Сопоставляли режущий инструмент по периоду износостойкости, т.е. по времени работы режущих пластин до достижения износа 0,5 мм по задней грани. Измерение износа осуществляли на мультисенсорном измерительном центре (видеоизмерительная машина) модели Micro Vu Sol 161. Результаты испытаний дублировали и документировали.

Обсуждение полученных результатов

Совокупность полученных результатов в разной мере опубликована в работах [11–13] авторов. В них показаны результаты при разных скоростях и глубине резания, иной конструкции пластин, разных методах упрочнения исходного инструментального материала ВК8, анализе составляющих силы резания.

Здесь приведены выборочные результаты. Так, на рис. 1 показано соотношение износостойкости субстрата (позиция 4) ВК8 и результатов его упрочнения разными покрытиями, а именно: позиция 1 – это инструментальный материал ВК8 + (AlCr)N(1,5 мкм) + (AlTi)N(2 мкм); позиция 3 – это ВК8 + Ti(до 1 мкм) + TiN(1 мкм) + (TiAl)N(2 мкм) + TiN(0,5 мкм); позиция 2 – это ВК8 + Ti(до 1 мкм) + TiN(1 мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм). В скобках указана толщина слоев покрытия. Во всех случаях нанесения покрытий применена фильтрация капельной фазы и ассистирование ускоренными электронами [14].

Анализ данных рис. 1 показывает:

1. Прирост износостойкости инструмента, имеющего покрытие (позиция 1), по сравнению с покрытием (позиция 3), несущественен (всего лишь в 1,22 раза), но это обеспечивает прирост длины пути резания на 1100 м, что имеет важное значение для обработки нержавеющей стали.

В сравнении с базовым инструментальным материалом (позиция 4) покрытие (позиция 1), обеспечивает прирост износостойкости в 1,66 раза и прирост длины пути резания на 1650 м.

2. Прирост износостойкости инструмента, имеющего покрытие (позиция 2), по сравнению с покрытием (позиция 3), не принципиален (всего лишь в 1,42 раза), но это обеспечивает прирост длины пути резания на 2200 м, что существенно.

В сравнении с базовым инструментальным материалом (позиция 4) покрытие (позиция 2) обеспечивает прирост износостойкости в 3 раза и прирост длины пути резания на 4950 м.

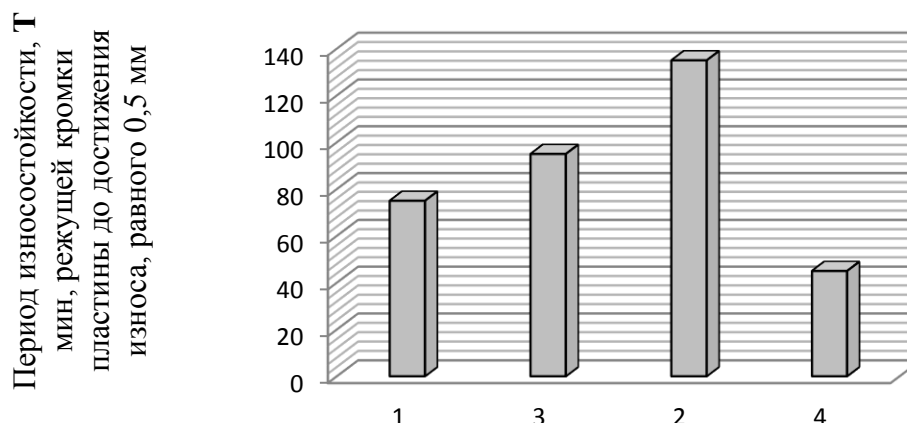


Рис. 1. Сопоставление износостойкости различных инструментальных материалов
 Fig. 1. Comparison of wear resistance of various tool materials

3. Прирост износостойкости инструмента, имеющего покрытие (позиция 2), по сравнению с покрытием (позиция 1), существенен (1,8 раза) и это обеспечивает прирост длины пути резания на 3300 м, что весьма существенно.

4. Из рассмотренных покрытий максимальный период износостойкости достигнут при применении покрытия Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) (нанесение слоев покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами, позиция 2). Этот период позволяет режущей кромке пройти путь длиной 7,4 км, что позволяет обрабатывать заготовки деталей высокой точности при высо-

копроизводительной обработке на станках с ЧПУ.

Дополнительно сообщаем, что применение покрытий стабилизировало разброс периода износостойкости инструмента. Так, например, у базового инструментального материала разброс составлял до 7 мин, при применении покрытий он снизился и, в частности, составил 4 мин при применении покрытия Ti(до 1 мкм) + TiN(1 мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм).

Стабилизация эксплуатационных свойств инструментальных материалов при применении покрытий отмечается в ряде работ [14–19], что связано с многофункциональной ролью покрытий, особенно наноструктурированных.

Библиографический список

- ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001716> (дата обращения: 02.12.2018)
- Мокрицкий Б.Я., Верещака А.А., Белых С.В., Мокрицкая Е.Б. Упрочнение сложносоставными покрытиями режущих пластин для обработки коррозионно-стойкой стали 09X17H7Ю // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 5 (137). С. 3–6.
- Григорьев С.Н. Современное вакуумно-плазменное оборудование и технологии комбинированного упрочнения инструмента и деталей машин // Технология машиностроения. 2004. № 3. С. 20–26.
- Андреев А.А., Григорьев С.Н. Износостойкие вакуумно-дуговые покрытия на основе титана в инструментальном производстве // СТН. 2006. № 2. С. 19–24.
- Табakov В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
- Vereshchaka A.A., Lee W.Y. High Precision // High Speed Machining Technologies. Edition of HRDI, S. Korea, Cheonan. 2002. 393 p.
- Vereshchaka A.A., Volosova M.A., Grigoriev S.N., Vereshchaka A.S. Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition, Procedia CIRP. 2013. Vol. 9. P. 8–12. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.159.
- Vereshchaka A.A., Volosova M.A., Batako A.D., Vereshchaka A.S., Mokritskii B.Y. Development of wear-resistant coatings compounds for high-speed steel tool using a combined cathodic vacuum arc deposition, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. Vol. 84. P. 1471–1482. DOI: 10.1007/s00170-015-7808-5.



9. Vereschaka A.A., Vereshchaka A.S., Batako A.D., Hojaev O.K., Mokritskii B.Y. Development and research of nanostructured multilayer composite coatings for tungsten-free carbides with extended area of technological applications, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 87. P. 3449–3457. DOI: 10.1007/s00170-016-8739-5.
10. ГОСТ 19052-80. Пластины режущие, сменные, многогранные, твердосплавные квадратной формы с отверстием и стружколомающими канавками на одной стороне. Конструкция и размеры [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200009446> (дата обращения: 02.12.2018)
11. Ситамов Э.С., Мокрицкий Б.Я. Результаты сравнительного исследования износостойкости твердосплавного инструмента при обработке нержавеющей стали // *Металлообработка*. 2018. № 4 (106). С. 7–13.
12. Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С. Оценка работоспособности токарных резцов с разными покрытиями при обработке стали 09X17H7Ю // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2018. Т. 14. № 10 (166). С. 447–449.
13. Сотова Е.С., Верещака А.А., Верещака А.С. Керамические режущие инструменты. М.: Изд-во Станкин, 2013. 148 с.

14. Моисеев В.Ф., Григорьев С.Н. Инструментальные материалы. М.: Изд-во Янус-К, 2005. 248 с.
15. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 380 с.
16. Uhlmann E., Huehns T., Richarz S., Reimers W., Grigoriev S. Development and application of coated ceramic cutting tools // *Industrial ceramics*. 2009. No. 2. P. 113–118.
17. Григорьев С.Н., Смоленцев Е.В., Волосова М.А. Технология обработки концентрированными потоками энергии: 2-е изд. Старый Оскол: ТНТ, 2010. 280 с.
18. Елютин А.В., Аникин В.Н., Блинков И.В., Верещака А.С. Методологические принципы создания высокопрочной градиентно-слоистой керамики с покрытием для скоростной лезвийной обработки без применения СОТС // *Конструкторско-технологическая информатика 2000: труды конгресса*. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2000. Т. 1. С. 180–182.
19. Vetter J. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating // *Material Science Forum*. 1994. Vol. 163–165. P. 527–532.

References

1. GOST 5632-72 *Stali vysokolegirovannye i splavy korrozionnostojkie, zharostojkie i zharoprochnye*. Marki [GOST 5632-72 High-alloy corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant steels and alloys. Brands]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200001716> (available at: 2 December 2018)
2. Mokrickij B.Ya., Vereshchaka A.A., Belyh S.V., Mokrickaya E.B. Hardening of cutting plates by composite coatings for stainless steel 09X17H7Ю treatment. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2016, no. 5 (137), pp. 3–6. (In Russ.).
3. Grigor'ev S.N. Modern vacuum-plasma equipment and technologies for the combined hardening of tools and machine parts. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2004, no. 3, pp. 20–26. (In Russ.).
4. Andreev A.A., Grigor'ev S.N. Wear-resistant titanium-based vacuum-arc coatings in tool production. *STIN*, 2006, no. 2, pp. 19–24. (In Russ.).
5. Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostojkikh ionno-plazmennyykh pokrytij rezhushchego instrumenta* [Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting tools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008, 311 p.
6. Vereshchaka A.A., Lee W.Y. High Precision // *High Speed Machining Technologies*. Edition of HRDI, S. Korea, Cheonan. 2002, 393 p.
7. Vereschaka A.A., Volosova M.A., Grigoriev S.N., Vereschaka A.S. Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition, *Procedia CIRP*, 2013, vol. 9, pp. 8–12. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.159.
8. Vereschaka A.A., Volosova M.A., Batako A.D., Vereshchaka A.S., Mokritskii B.Y. Development of wear-

- resistant coatings compounds for high-speed steel tool using a combined cathodic vacuum arc deposition, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2016, vol. 84, pp. 1471–1482. DOI: 10.1007/s00170-015-7808-5.
9. Vereschaka A.A., Vereshchaka A.S., Batako A.D., Hojaev O.K., Mokritskii B.Y. Development and research of nanostructured multilayer composite coatings for tungsten-free carbides with extended area of technological applications, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2016, vol. 87, pp. 3449–3457. DOI: 10.1007/s00170-016-8739-5.
10. ГОСТ 19052-80. *Plastiny rezhushchie smennye mnogogrannnye tverdospлавные квадратной формы с отверстием и стружколомающими канавками на одной стороне. Конструкция и размеры* [GOST 19052-80. Replaceable cutting polyhedral carbide square inserts with a hole and chip breaker grooves on one side. Design and dimensions]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200009446> (available at: 2 December 2018)
11. Sitamov E.S., Mokrickij B.Ya. Results of comparative investigation of wear-resistance of meldomed tools for stainless steel processing. *Metallrobrabotka*, 2018, no. 4 (106), pp. 7–13. (In Russ.).
12. Mokrickij B.Ya., Sitamov E.S. Evaluation of serviceability of turning tools with different coatings in steel 09Kh17N7Yu processing. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2018, vol. 14, no. 10 (166), pp. 447–449. (In Russ.).
13. Sotova E.S., Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S. *Keramicheskie rezhushchie instrumenty* [Ceramic cutting tools]. Moscow: STANKIN Publ., 2013, 148 p. (In Russ.).
14. Moiseev V.F., Grigor'ev S.N. *Instrumental'nye materialy* [Tool Materials]. Moscow: Yanus-K Publ., 2005,

248 p. (In Russ.).

15. Grigor'ev S.N., Tabakov V.P., Volosova M.A. *Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostojkosti kontaktnyh ploshchadok rezhushchego instrumenta* [Technological methods to improve wear resistance of cutting tool contact pads]. Staryj Oskol: TNT, 2011, 380 p. (In Russ.).

16. Uhlmann E., Huehns T., Richarz S., Reimers W., Grigoriev S. Development and application of coated ceramic cutting tools, *Industrial ceramics*, 2009, no. 2, pp. 113–118.

17. Grigor'ev S.N., Smolencev E.V., Volosova M.A. *Tekhnologiya obrabotki koncentrirovannymi potokami energii* [Concentrated energy flow processing technology]. Staryj Oskol: TNT, 2010, 280 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С., Серебренникова А.Г. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мокрицкий Борис Яковлевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27,
Россия;
e-mail: office.knastu.ru

Ситамов Эрадж Сикандарович,
аспирант,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27,
Россия;
e-mail: Eraj_2303@mail.ru

Серебренникова Анжела Геннадьевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27,
Россия;
e-mail: office.knastu.ru

18. Elyutin A.V., Anikin V.N., Blinkov I.V., Vereshchaka A.S. *Metodologicheskie principy sozdaniya vysokoproduktivnoy gradientno-sloistoy keramiki s pokrytiem dlya skorostnoj lezvinoj obrabotki bez primeneniya SOTS* [Methodological principles for the creation of high-strength gradient-layered ceramics with the coating for high-speed blade processing without the use of SOTS]. *Trudy kongressa "Konstruktorsko-tekhnologicheskaya informatika" 2000* [Proceedings of the congress "Design and Technological Informatics 2000"]. Moscow: MGTU «STANKIN», 2000, vol. 1, pp. 180–182. (In Russ.).

19. Vetter J. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating. *Material Science Forum*, 1994, vol. 163–165, pp. 527–532.

Authorship criteria

Mokritskiy B.Ya., Sitamov E.S., Serebrennikova A.G. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris Ya. Mokritskiy,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering
Technology of
Komsomolsk-na-Amure State University,
27 Lenin St., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia;
e-mail: office.knastu.ru

Eradzh I. Sitamov,
Postgraduate of Komsomolsk-na-Amure
State University,
27 Lenin St., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia;
e-mail: Eraj_2303@mail.ru

Andzhela G. Serebrennikova,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Mechanical Engineering Technology of
Komsomolsk-na-Amure State University,
27 Lenin St., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia;
e-mail: office.knastu.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.43

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-252-259>

Модернизация лопастных двигателей внутреннего сгорания

© А.Г. Осипов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – проанализировать достоинства и недостатки современных лопастных двигателей внутреннего сгорания, провести их модернизацию. Дано понятие о цепных химических реакциях. Приведена историческая справка развития двигателей внутреннего сгорания. Представлены результаты аналитических исследований влияния параметров камеры сгорания на индикаторные показатели двигателя внутреннего сгорания. Осуществлено патентование модернизированного лопастного двигателя внутреннего сгорания. При оптимизации процесса сгорания в нем использованы методы аналитического анализа. Сравнительная оценка технических показателей поршневых и лопастных двигателей внутреннего сгорания проведена на основании изучения литературных источников. Результаты аналитических исследований показали, что модернизированные лопастные двигатели внутреннего сгорания обладают повышенными мощностными и экономическими индикаторными показателями. Установлено, что модернизированные лопастные двигатели внутреннего сгорания имеют более высокие, по сравнению с существующими лопастными двигателями внутреннего сгорания, технические показатели, а конструкция этих двигателей характеризуется патентной чистотой, что позволяет констатировать целесообразность их практического применения.

Ключевые слова: процесс сгорания, эволюция двигателей внутреннего сгорания, камера сгорания, форма камеры сгорания, объем камеры сгорания, индикаторные показатели рабочего цикла

Информация о статье: Дата поступления 29 января 2019 г.; дата принятия к печати 18 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Осипов А.Г. Модернизация лопастных двигателей внутреннего сгорания. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 252–259. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-252-259.

Vane internal combustion engine upgrade

Artur G. Osipov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: Having analyzed the advantages and disadvantages of modern vane internal combustion engines, the latter have been upgraded. The concept of chain chemical reactions is defined. The historical reference is given on the development of internal combustion engines. The results of analytical studies of the effect of combustion chamber parameters on internal combustion engine indicator characteristics are presented. The upgraded vane internal combustion engine has been patented. The combustion process in the named engine is optimized with the use of analytical analysis methods. Technical indicators of piston and vane internal combustion engines are compared on the basis of literature review. The results of analytical studies show that the upgraded vane internal combustion engines feature the increased power and economic indicating performances. It is found out that technical parameters of the upgraded vane internal combustion engines are higher as compared with the existing vane internal combustion engines. The design of the upgraded engines is characterized by patent purity, which allows for the feasibility of their practical application.

Keywords: combustion process, evolution of internal combustion engines, combustion chamber, shape of a combustion chamber, volume of a combustion chamber, working cycle indicators

Information about the article: Received January 29, 2019; accepted for publication March 18, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Osipov A.G. Vane internal combustion engine upgrade. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 252–259. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-252-259.

Введение

Горение – сложный физико-химический процесс соединения на молекулярном уровне компонентов горючих веществ с кислородом воздуха, сопровождающийся выделением тепла и света, известен человечеству с древних времен. Однако специфические особенности этого процесса полностью не изучены, и оптимизация протекания или прекращения этого процесса не утратила своей актуальности и в настоящее время.

Специфика и сложность процесса горения заключается в том, что наряду с соединением атомов углерода и водорода с атомарным кислородом воздуха и выделением тепла могут протекать обратные реакции, сопровождающиеся распадом соединений, образующихся в процессе горения.

Учесть при горении все возможные химические превращения и промежуточные реакции практически невозможно, однако, опираясь на накопленный наукой опыт, можно установить связь между исходным состоянием горючих соединений с конечным результатом.

Общепринятой теорией процесса горения в настоящее время остается положение о цепных реакциях. Впервые это положение было высказано Боденштейном в 1913 г. Над развитием этой теории позднее работали Хиншельвуд, Христиансен и Кример, а также другие известные ученые. Положение о цепных реакциях было положено русским ученым А.Н. Бахом в основу теории процессов сгорания в двигателях внутреннего сгорания [1].

В СССР ряд исследователей, включая акад. Н.Н. Семенова, применили цепную теорию горения к процессам воспламенения и взрыва и создали теорию разветвляющихся цепей. Согласно этой теории, наиболее характерным механизмом распространения пламени является цепочно-тепловой механизм, представляющий собой сложный вид цепной реакции с выделением теплоты и повышением температуры [1].

Повышение температуры способствует увеличению количества активных

центров, а, следовательно, развитию цепных реакций. Например, если при температуре 27°C из 100000 столкновений атомарного кислорода с водородом к цепной реакции ведет только одно столкновение, то при температуре 327°C – уже тысяча [1].

В цепочно-тепловом механизме химическая реакция горения возможна только в случае столкновения двух молекул, обладающих энергией, превышающей определенную среднюю величину, т. е. при наличии активного центра. При этом для начала реакции горения необходим внешний возбудитель в виде электрического разряда, например, искры в бензиновом двигателе или наиболее нагретой части факела впрыскиваемого в дизелях топлива.

В начальной стадии горения активными центрами при окислении углеводородов являются в основном перекисные соединения, но по мере развития цепных реакций и распространения фронта пламени в качестве активных центров могут выступать свободные радикалы, атомы и осколки молекул. При этом каждые два активных центра способствуют образованию четырех новых центров, каждый из которых, в свою очередь, способствует дальнейшему развитию цепных реакций.

Процессы горения используются в различных тепловых установках и машинах на протяжении почти двух столетий. Особенно широкое распространение эти процессы получили в тепловых двигателях, в том числе, двигателях внутреннего сгорания, в которых тепловая энергия трансформируется в механическую работу.

Развитие двигателей внутреннего сгорания (ДВС) началось в 60-х годах XIX в., хотя идея сжигания топлива внутри цилиндра поршневой машины и превращения тепла в механическую работу уже возникла в конце XVIII в. [2].

Начало создания ДВС было положено нидерландским, а по немецким источникам – датским физиком и математиком Х. Гюйгенсом, построившим в 1673 г. пороховой двигатель.



К 60-м годам XIX в. относится появление первого газового ДВС французского изобретателя Э. Ленуара – 1858–1860 гг. Этот двигатель работал на светильном газе без такта сжатия и поэтому имел низкую мощность и не превышающую 4% экономичность, так как процесс сгорания проходил не в камере сгорания, а в верхней части цилиндра. Горючая смесь воспламенялась в момент прохождения поршнем 2/3 своего хода, при этом значительная часть тепла терялась через стенки цилиндра, снижая термический коэффициент полезного действия двигателя. Отсутствие такта сжатия обуславливало низкое среднее индикаторное давление рабочего цикла, что приводило, в свою очередь, к снижению мощностных показателей двигателя [2].

В 1876 г. в Кельне появился первый четырехтактный ДВС немецкого механика Н. Отто. Его удельная мощность не превышала 0,7 кВт·ч/т, так как масса двигателя составляла 2 т.

К концу XIX в. с освоением процессов нефтепереработки получают развитие ДВС, работающие на жидком топливе (бензине, керосине и более тяжелых фракциях). Высокий КПД этих двигателей, по сравнению с паровыми двигателями, небольшие габариты и масса обусловили их быстрое развитие и применение на транспортных средствах.

В 1886 г. швабский инженер Г. Даймлер устанавливает «легкий и быстро работающий двигатель» на «скаковую коляску», послужившую прототипом современных мотоциклов, а его соотечественник – баденский инженер-слесарь К. Бенц, установив двигатель на 4-колесную карету «Америкэн», получает автомобиль. Ранее К. Бенц разрабатывает свой бензиновый ДВС и патентует самоходный трехколесный экипаж.

В 1889 г. в России капитан русского флота И.С. Костович создает бензиновый двигатель для дирижабля. Двигатель имел ряд новшеств, в частности – оппозитное расположение цилиндров, искровое зажигание и способность развивать мощность 59 кВт [2].

В 1895 г. в Германии Р. Дизель выдвигает идею создания двигателя с самовоспламенением топлива от температуры сжатого воздуха.

В 1899 г. в Петербурге на заводе Э. Нобеля создается первый работоспособный двигатель с самовоспламенением топлива – дизель.

Улучшенные бескомпрессорные дизели конструкции Г.В. Тринклера были построены в 1901 г., а конструкции Я.В. Мамина – в 1910 г. [2].

В настоящее время создаются конструктивно новые ДВС и модернизируются существующие модели двигателей. При этом главными тенденциями развития ДВС нового поколения являются повышение их удельных показателей и снижение токсичности выбрасываемых в атмосферу продуктов сгорания.

Перспективными в этом ключе, на наш взгляд, являются лопастные двигатели внутреннего сгорания (ЛДВС), поскольку их конструкция обладает основными достоинствами как традиционных поршневых, так и роторно-поршневых ДВС и неотягощена их недостатками [3–6].

Существенными недостатками поршневых двигателей следует считать низкий КПД (от 20 до 40%), связанный с большими тепловыми потерями, значительные по величине инерционные силы возвратно-поступательно движущихся деталей, большое число узлов трения, относительно крупные габариты (по сравнению с другими ДВС), а также повышенный шум, возникающий из-за вибраций движущихся деталей [7].

К одному из недостатков роторно-поршневых ДВС следует отнести склонность к перегреву из-за линзовидной формы камеры сгорания. В отличие от последней, классические поршневые ДВС имеют сферическую форму камеры сгорания. Топливо, сгораемое в камере линзовидной формы, превращается в тепловую энергию, расходуемую не только на рабочий ход, но и на нагрев всего двигателя, что приводит к его износу и выходу из строя [8].

Кроме вышеотмеченного, камера сгорания в роторном двигателе располага-

ется с одной стороны и выделяемое в процессе сгорания тепло интенсивнее нагревает одну из сторон двигателя, что приводит к неравномерному расширению металла и температурным напряжениям деталей.

При работе роторного двигателя значительная часть нагрузок ложится на уплотнители между ротором и корпусом. Поскольку уплотнители подвергаются постоянному перепаду давления, максимальный ресурс роторного двигателя по пробегу составляет не более 100–150 тыс. км.

Также роторный двигатель очень требователен к обслуживанию. Расход масла у него составляет более 500 мл на одну тысячу километров пробега, что приводит к необходимости заливать смазку каждые 4–5 тыс. км пробега. Если вовремя не произвести доливку масла, двигатель может выйти из строя [8].

Современная конструкция ЛДВС, относительно существующих конструкций ДВС, имеет следующий ряд преимуществ: малые удельные габариты, незначительные инерционные силы движущихся компонентов, небольшой расход смазочных материалов, низкую себестоимость изготовления, благодаря сокращению количества сложных деталей, а также небольшую металлоемкость в связи с компактностью двигателя.

Уместно отметить, что основным преимуществом конструкции ЛДВС является большой рабочий объем при незначительных размерах корпуса двигателя (рис. 1) [9–14].

Как отмечалось в [9], рабочие объемы существующих роторных (рис. 1 а) и роторно-лопастных (рис. 1 б) ДВС составляют примерно 1/3 всего объема внутренней полости двигателей, а рабочий объем ЛДВС (рис. 1 с) занимает почти весь объем этой полости, что позволяет с малогабаритного компактного ЛДВС снимать большую мощность и устанавливать его в малогабаритных отсеках боевых и специальных машин.

ЛДВС выгодно отличаются от роторно-поршневых двигателей не только увеличенным рабочим объемом, но и технологичностью изготовления корпуса, имеющего форму тора, рабочего лопастного ротора, а также других конструктивных компонентов, обеспечивающих превращение тепла в механическую работу.

К достоинствам ЛДВС, отмеченным в [10], относится также достаточно простая кинематика кривошипно-шатунного механизма, преобразующего поворотные движения ротора во вращательное движение выходного вала отбора мощности; незначительное, по сравнению с другими ДВС, количество узлов трения, смазка которых легко

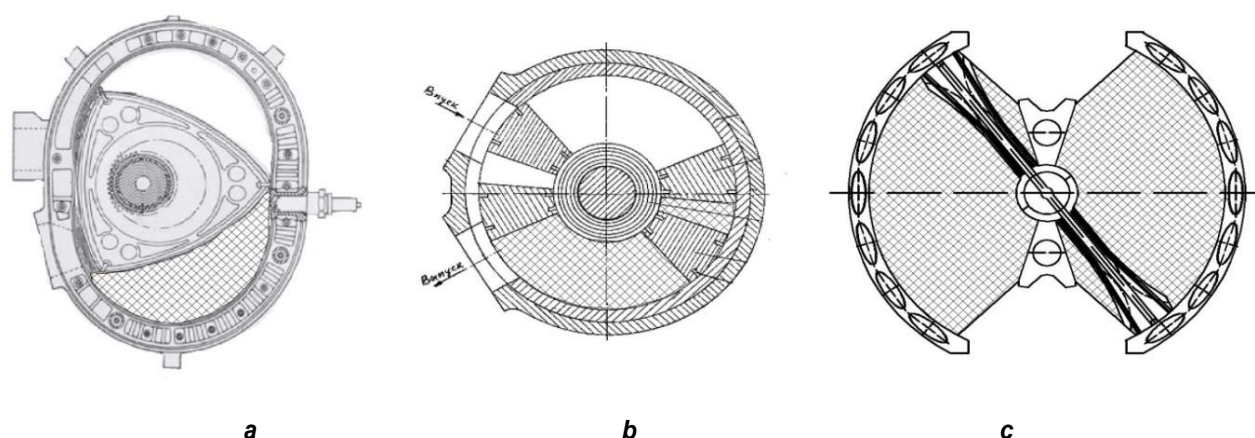


Рис. 1. Рабочие объемы роторных двигателей разных конструкций:
а – рабочий объем двигателя Ванкеля; б – рабочий объем роторно-лопастного двигателя
Вигряннова; с – рабочий объем лопастного двигателя внутреннего сгорания
Fig. 1. Working volumes of rotary engines of different designs: а – working volumes
of the Wankel engine; б – working volume of the Vigryanov rotary vane engine;
с – working volume of the vane internal combustion engine



осуществима; небольшие массы движущихся деталей, а, следовательно, уменьшенные значения инерционных нагрузок и вибраций, а также незначительная металлоемкость (в связи с небольшими размерами деталей, а, следовательно, невысокая стоимость их изготовления).

Конструкция современного ЛДВС, описанная в [10], содержит корпус с торцевыми крышками, съемные или выполненные заодно с корпусом радиальные выступы, ротор с поршнями в виде лопастей, жестко закрепленный на качающемся рабочем валу, кривошипно-шатунный механизм, преобразующий поворотные движения ротора во вращательное движение выходного вала отбора мощности, впускные и выпускные каналы с запорными компонентами для подвода горючей смеси и отвода отработавших газов, механизмы газораспределения с цепным или ременным приводом распределительных валов, герметизирующие и масло-съемные компоненты, свечи искрового зажигания, системы питания, смазки и охлаждения, а также, возможно, устройство, регулирующее степень сжатия для обеспечения работы двигателя на разном топливе.

Наряду с вышеперечисленными достоинствами ЛДВС, необходимо отметить их недостатки, к которым прежде всего следует отнести неудовлетворительный процесс сгорания рабочей смеси, а также повышенный тепловой режим работы этих двигателей.

Эти недостатки в работе ЛДВС обусловлены тем, что сгорание рабочей смеси в этих двигателях происходит в относительно большом объеме рабочей полости, не обеспечивающем быстрое и полное сгорание топлива. При этом догорание последнего происходит во время рабочего хода, когда лопастной поршень начинает отходить от мертвой точки, увеличивая тем самым объем рабочей полости и тепловые потери через стенки корпуса. В результате этого происходит снижение индикаторной мощности, падение коэффициента полезного действия и повышение теплового режима работы ЛДВС.

Для устранения вышеотмеченных недостатков ЛДВС на кафедре «Конструирования и стандартизации в машиностроении» Иркутского национального исследовательского технического университета проведена модернизация этих двигателей (рис. 2).

Она заключалась в изготовлении съемных радиальных выступов из двух разборных частей 4 и 5, предназначенных для разделения внутренней полости двигателя на рабочие полости (рис. 2). На плоскостях каждой из внутренних частей радиальных выступов 5 выполнено по две камеры сгорания 6, так что все четыре рабочих полости 2 корпуса 1 снабжены камерами сгорания, как показано в разрезе А-А двигателя на рис. 2.

Наличие камер сгорания 6 во всех четырех рабочих полостях 2 обеспечивает полное сгорание топлива, уменьшение тепловых потерь, равномерный нагрев компонентов двигателя и повышение его индикаторной мощности и коэффициента полезного действия.

Для увеличения объема рабочих полостей 2 в процессе модернизации ЛДВС лопастные поршни 3 ротора выполнены плоскими, занимающими во внутренней полости двигателя наименьший объем.

В процессе модернизации ЛДВС тип камер сгорания и их конфигурация выбирались в соответствии с заданным для двигателя видом топлива и степенью сжатия. Распространенные в настоящее время в ДВС типы камер сгорания представлены на рис. 3.

Предварительно с целью установления взаимосвязи между типом камеры сгорания и возможной степенью сжатия двигателя были проведены аналитические исследования, результаты которых показаны на рис. 4.

Как видно на рис. 4, в зависимости от вида топлива, на котором предполагается работа проектируемого ЛДВС, можно подобрать тип и конфигурацию камер сгорания, обеспечивающих достаточно быстрое, но бездетонационное сгорание топлива.

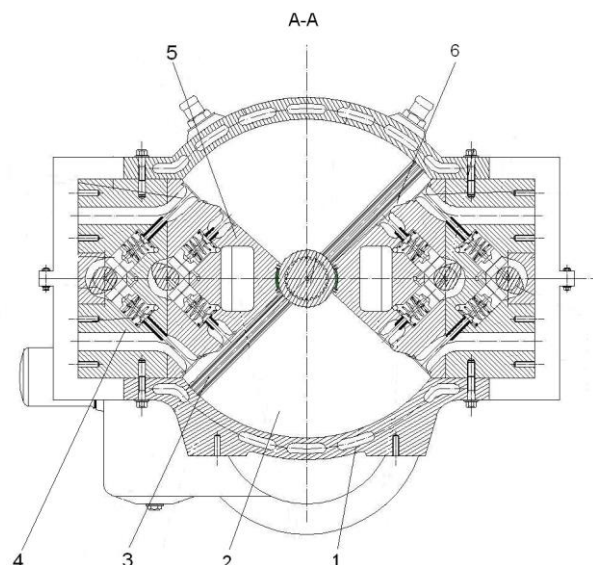


Рис. 2. Модернизация лопастного двигателя внутреннего сгорания: 1 – корпус; 2 – рабочая полость; 3 – ротор с поршнями в виде лопастей; 4 – наружный съемный радиальный выступ; 5 – внутренний съемный радиальный выступ с камерами сгорания; 6 – камера сгорания
Fig. 2. Upgrade of vane internal combustion engine: 1 – body; 2 – working space; 3 – rotor with vane pistons; 4 – external removable radial lug; 5 – internal removable radial lug with combustion chambers; 6 – combustion chamber

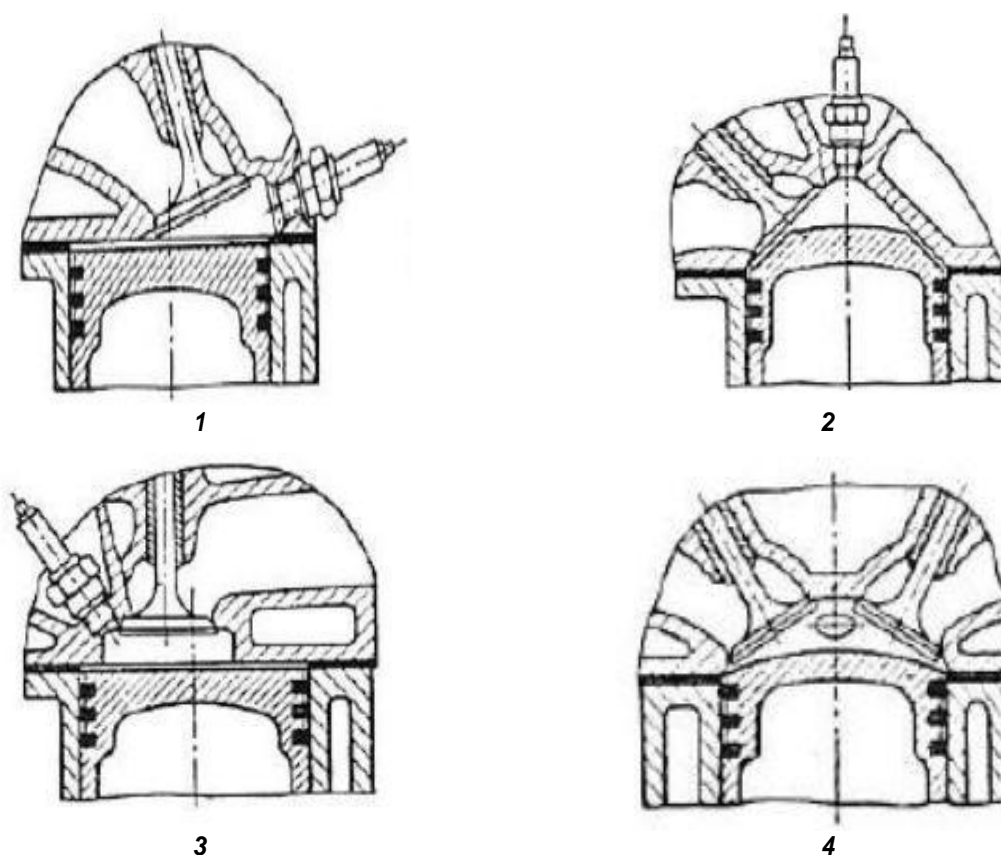


Рис. 3. Распространенные в двигателях внутреннего сгорания типы камер сгорания:
1 – клиновая; 2 – шатровая; 3 – плоскоовальная; 4 – полусферическая камера сгорания
Fig. 3. Types of combustion chambers used in internal combustion engines: 1 – wedge shaped; 2 – spherical; 3 – bath-tub; 4 – hemispherical combustion chamber

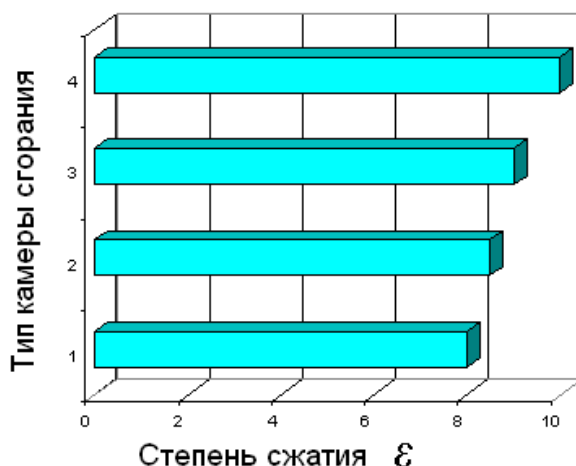


Рис. 4. Взаимосвязь между типом камеры сгорания и возможной степенью сжатия двигателя:

1 – клиновидная; 2 – шаровидная; 3 – плоскоовальная; 4 – полусферическая камера сгорания

Fig. 4. Relationship between the type of the engine combustion chamber and possible compression ratio:

1 – wedge-shaped; 2 – spherical; 3 – bath-tub; 4 – hemispherical combustion chamber

Заключение

Таким образом, в процессе модернизации ЛДВС, заключающейся в установке во всех рабочих полостях этих двигателей соответствующих камер сгорания, можно активизировать процесс горения, повысить скорость распространения фронта пламени и добиться наиболее полного сгорания топлива в ограниченном объеме, при этом увеличить индикаторное давление и мощность, повысить термический коэффициент полезного действия и нормализовать температурный режим работы ЛДВС.

Предложенные в процессе модернизации ЛДВС конструктивные решения характеризуются патентной чистотой, о чем свидетельствует полученный ИРНТУ в 2018 г. патент [11–14].

Вышеотмеченное позволяет заключить о целесообразности применения модернизированного ЛДВС в практике двигателестроения, особенно в случаях, когда от компактной силовой установки требуются высокие мощностные показатели, что характерно для боевых машин.

Библиографический список

1. Ленин И.М. Теория автомобильных и тракторных двигателей. М.: Машиностроение, 1969. 368 с.
2. Осипов А.Г. Автомобильный транспорт, обслуживание и ремонт. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 270 с.
3. А. с., СССР, № 1442683, МПК 7F02B53/00. Роторный двигатель внутреннего сгорания / А.Ф. Мошков, Н.А. Шаповалов. 07.12.1988 г.
4. Пат. № 3811760, ФРГ, МПК 7F02B53/00, F01C9/00. Двухтактный двигатель внутреннего сгорания с качающимся ротором-поршнем. 01.06.1989.
5. Пат. № 2528241, RU, МПК 7F02B53/00, F01C9/00 / Ткаченко Юрий Сергеевич. Двигатель внутреннего сгорания с качающимся поршнем.
6. Пат. № 2240432, RU, МПК 7F02B55/00, F01C9/00 / Самарский Сергей Петрович. Двигатель внутреннего сгорания с качающимся ротором-поршнем. 2004.
7. Автомобильные двигатели. М.: Машиностроение, 1967. 496 с.
8. Роторные двигатели прошлое, настоящие, будущее. Двигатель Ванкеля [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rotor-motor.ru/page05.htm> (дата обращения: 12.03.2018)
9. Осипов А.Г., Портнов А.Н. Анализ конструкций двигателей внутреннего сгорания // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей V Всероссийской науч.-практ. конф. (г. Иркутск 16–18 апреля, 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 347–353.
10. Осипов А.Г., Портнов А.Н. Проект лопастного двигателя внутреннего сгорания // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей V Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Иркутск 16–18 апреля, 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 354–360.
11. Пат. № 2659602, Российская Федерация, МПК F01C 9/00, F02B 53/00, F02D 15/00. Лопастной двигатель внутреннего сгорания / А.Г. Осипов, А.Н. Порт-

нов; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. № 2017119883; заявл. 07.06.2017, опубл. 03.07.2018. Бюл. № 19.
12. Дорфман В.С. [и др.]. Современные материалы в автомобилестроении. М.: Машиностроение,

2007. 271 с.

13. Сороко-Новицкий В.И. Испытания автотракторных двигателей. М.: Машиностроение, 1950. 378 с.

14. Михайловский Е.В., Серебряков К.Б., Тур Е.Я. Устройство автомобиля. 6-е изд., стереотип. М.: Машиностроение, 2001. 342 с.

References

1. Lenin I.M. *Teoriya avtomobil'nyh i traktornyh dvigatelej* [Theory of automobile and tractor engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969, 368 p. (In Russ.).
2. Osipov A.G. *Avtomobil'nyj transport, obsluzhivanie i remont* [Motor transport, maintenance and repair]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2006, 270 p. (In Russ.).
3. Moshkov A.F., Shapovalov N.A. *Rotornyj dvigatel' vnutrennego sgoraniya* [Rotary internal combustion engine]. Copyright certificate RF, no. 1442683, MPK 7F02B53/00. December 7, 1988.
4. *Dvuhstaktnyj dvigatel' vnutrennego sgoraniya s kachayushchimsya rotorom-porshnem* [Two-stroke swing rotor piston internal combustion engine]. Patent RF, no. 3811760, 1989.
5. Tkachenko Yu.S. *Dvigatel' vnutrennego sgoraniya s kachayushchimsya porshnem* [Swing piston internal combustion engine]. Patent RF, no. 2528241.
6. Samarskij S.P. *Dvigatel' vnutrennego sgoraniya s kachayushchimsya rotorom-porshnem* [Swing rotor piston internal combustion engine]. Patent RF, no. 2240432, 2004.
7. *Avtomobil'nye dvigateli* [Motor-car engine]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967, 496 p. (In Russ.).
8. Rotornye dvigateli proshloe, nastoyashchie, budushchie. *Dvigatel' Vankelya* [Rotary engines: past, present, future. Wankel engine]. URL: <http://www.rotor-motor.ru/page05.htm> (available at: March 12, 2018).
9. Osipov A.G., Portnov A.N. *Analiz konstrukcij dvigatelej*

vnutrennego sgoraniya [Analysis of internal combustion engine designs]. *Sbornik statej V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collected works of V All-Russian scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia, Irkutsk, 16–18 April 2015]. Irkutsk, 2015, pp. 347–353. (In Russ.).

10. Osipov A.G., Portnov A.N. *Proekt lopastnogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Design of a vane internal combustion engine]. *Sbornik statej V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collected works of V All-Russian scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia", Irkutsk, 16–18 April 2015]. Irkutsk, 2015, pp. 354–360. (In Russ.).

11. Osipov A.G., Portnov A.N. *Lopastnoj dvigatel' vnutrennego sgoraniya* [Vane internal combustion engine]. Patent RF, no. 2659602, 2018.

12. Dorfman V.S. *Sovremennye materialy v avtomobilestroenii* [Modern materials in the automotive industry]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2007, 271 p. (In Russ.).

13. Soroko-Novickij V.I. *Ispytaniya avtotraktornyh dvigatelej* [Tests of automotive tractor engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1950, 378 p. (In Russ.).

14. Mihajlovskij E.V., Serebryakov K.B., Tur E.Ya. *Ustrojstvo avtomobilya* [Motor car structure]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001, 342 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Осипов А.Г. проанализировал достоинства и недостатки современных лопастных двигателей внутреннего сгорания, провел их модернизацию. Автор получил и оформил научные результаты, и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Osipov A.G. has analyzed the advantages and shortcomings of modern rotary vane internal combustion engines and upgraded them. The author has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Осипов Артур Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: arthur.osipov@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Artur G. Osipov

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Design and Standardization
in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: arthur.osipov@rambler.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621. 318.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-260-270>

Исследование режимов работы длинноходового электромагнитного молота методом компьютерного моделирования

© В.Е. Павлов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Проведено исследование режимов работы длинноходового электромагнитного двухкатушечного молота с увеличенной скоростью бойка и энергией удара. Теоретические исследования проводились с применением методов теории поля и систем линейных, а также нелинейных дифференциальных уравнений. Экспериментальные исследования проводились методами моделирования и натурными испытаниями. Математическая модель длинноходового молота получена с использованием экспериментально снятых статических характеристик потокосцепления и силы тяги для каждой из обмоток. Получены осциллограммы тока обмоток, скорости и хода бойка. Установлена величина потребляемой из сети энергии, мощность потерь в меди и энергии удара, а также коэффициент полезного действия за цикл работы молота. Длинноходовой режим работы обычного молота может быть использован для повышения эффективности его работы. При этом значения энергии ударов и коэффициента полезного действия длинноходового молота существенно возрастают, частота ударов снижается, а нагрев машины практически не изменяется.

Ключевые слова: длинноходовой электромагнитный молот, обмотки молота, боек, датчики положения бойка, энергия удара, коэффициент полезного действия молота

Информация о статье: Дата поступления 21 января 2019 г.; дата принятия к печати 13 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Павлов В.Е. Исследование режимов работы длинноходового электромагнитного молота методом компьютерного моделирования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. №2. С. 260–270. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.

Study of long stroke electromagnetic hammer operation modes by computer simulation

Vladimir E. Pavlov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The study is given to the operation modes of a long stroke electromagnetic two-coil hammer with increased striker velocity and impact energy. Theoretical studies involve the use of the methods of field theory and mathematical apparatus of the systems of linear and nonlinear differential equations. Experimental studies are carried out by modeling methods and field tests. The mathematical model of the long stroke hammer is obtained using experimentally obtained static characteristics of the flux linkage and the thrust force for each of the windings. The oscillograms of winding current, striker velocity and travel are obtained. The amount of the energy consumed from the network, power losses in copper, impact energy and hammer efficiency in one operation cycle are determined. A long stroke operation mode of a conventional hammer can be used to improve its operation efficiency. In this case, the values of the impact energy and efficiency of the long stroke hammer significantly increase, whereas the impact frequency decreases and the heating of the machine practically does not change.

Keywords: long stroke electromagnetic hammer, hammer winding, striker, striker position sensors, impact energy, hammer efficiency

Information about the article: Received January 21, 2019; accepted for publication March 13, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Pavlov V.E. Study of long-stroke electromagnetic hammer operation modes by computer simulation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 260–270. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.

Введение

Наиболее перспективными из электрических молотов являются электромагнитные машины ударного действия, разработанные Институтом горного дела СО РАН [1–3], которые имеют простую конструкцию и высокую надежность работы, не загрязняют атмосферу выхлопными газами.

Несмотря на то, что электромагнитные молоты просты по конструкции, в рабочем процессе они представляют определенные затруднения.

Наиболее сложными являются вопросы энергопреобразования в электромагнитной машине ударного действия [1–3]. Решение данного вопроса позволит правильно подойти к оценке конструкции электромагнитных машин. Однако для успешного решения этой задачи необходимо установить общие взаимосвязи между электрическими, магнитными, тепловыми и механическими параметрами отдельных элементов системы как единого комплекса [4–6]. Дальнейшее развитие теории преобразования энергии в электромагните должно обосновать условия, при которых обеспечивается наибольший коэффициент полезного действия (КПД), определение рациональных форм импульса напряжения, подводимого к катушке, конструкции машин и схем их управления. Вопрос энергопреобразования неразрывно связан с вопросом формирования цикла работы молота. В работах [7–9] даются важные рекомендации по организации цикла работы молота, реализуя которые можно получить либо максимальное быстроедействие машины, либо обеспечить ее наибольший КПД.

Принципиальной особенностью электромагнитных машин ударного действия является их работа в динамических режимах, при этом машина совместно с силовым статическим преобразователем образует существенно нелинейную электромеханическую систему. Поэтому анализ динамических режимов с учетом основных нелинейностей представляет значительные трудности.

Методы компьютерного моделирования с применением имитационной среды

Simulink пакета *Matlab* используются в настоящее время для исследования объектов в системах практически любой сложности [10–14]. К немаловажным достоинствам данного метода можно отнести возможность наблюдения за процессом во времени.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы разработать математическую модель длинноходового электромагнитного молота с учетом основных нелинейностей, позволяющую исследовать энергетические показатели за цикл работы молота.

Математическое описание электромагнитного молота

Длинноходовой электромагнитный молот (рис. 1) отличается от простого двухкатушечного молота тем, что с целью увеличения энергии удара (за счет увеличения скорости бойка) в него введены две направляющие трубы и два дополнительных датчика положения бойка [12].

Структурная схема управления длинноходовым электромагнитным молотом (рис. 2) содержит блок управления (БУ), управляемые выпрямители (УВ1) и (УВ2), датчики положения бойка: датчик удара (ДУД), датчик нижнего положения (ДНП), датчик верхнего положения (ДВП), датчик крайнего верхнего положения бойка (ДКВП).

Блок управления организует работу молота по сигналам, поступающим от задающего устройства (Уз1, Уз2) и от датчиков положения бойка (ДУД, ДНП, ДВП, ДКВП). Первоначально боек находится в крайнем нижнем положении. При подаче напряжения задания на выпрямительный режим работы УВ2 боек втягивается в катушку электромагнита L2. При выходе нижнего края бойка из ДНП подается сигнал на перевод УВ2 в инверторный режим с последующим включением управляемого выпрямителя УВ1 в выпрямительный режим. В результате чего снижается до нуля ток в катушке электромагнита L2, а затем нарастает ток в катушке электромагнита L1 и боек втягивается в эту катушку. При подходе верхнего края бойка к датчику верхнего положения ДВП подается

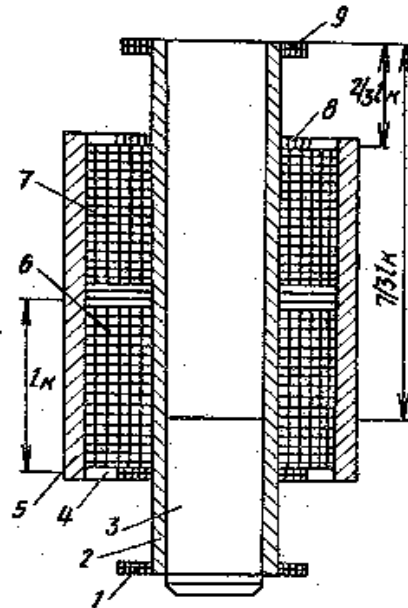


Рис. 1. Длинноходовой электромагнитный молот: 1 – датчик удара; 2 – направляющая труба; 3 – боек; 4 – датчик положения; 5 – корпус молота; 6, 7 – катушки электромагнитов; 8 – датчик верхнего положения бойка; 9 – датчик крайнего верхнего положения бойка
Fig. 1. Long stroke electromagnetic hammer: 1 – shock sensor; 2 – guide tube; 3 – striker; 4 – position sensor; 5 – hammer body; 6, 7 – electromagnet coils; 8 – sensor of the striker upper position; 9 – sensor of the extreme upper position of the striker

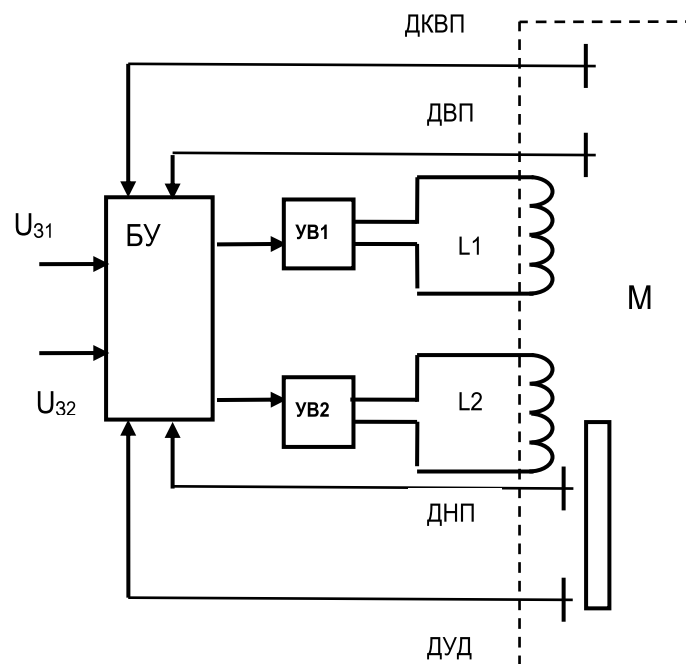


Рис. 2. Структурная схема управления длинноходовым электромагнитным молотом
Fig. 2. Block diagram of long stroke electromagnetic hammer control

сигнал на перевод УВ1 в инверторный режим и ток в катушке электромагнита L1 снижается до нуля, а боек за счет накопленной кинетической энергии продолжает движение вверх. При подходе верхнего края бойка

к датчику крайнего верхнего положения подается сигнал на перевод УВ1 в выпрямительный режим и боек втягивается в катушку электромагнита L1. При движении

вниз на выходе верхнего края бойка из датчика верхнего положения ДВП подается сигнал на перевод УВ1 в инверторный режим с последующим включением управляемого выпрямителя УВ2 в выпрямительный режим. В результате чего снижается до нуля ток в катушке электромагнита L1, а затем нарастает ток в катушке электромагнита L2 и боек втягивается в эту катушку. При подходе нижнего края бойка к датчику нижнего положения ДНП подается сигнал на перевод УВ2 в инверторный режим и ток в катушке электромагнита L2 снижается до нуля, а боек за счет накопленной кинетической энергии продолжает движение вниз. При подходе нижнего края бойка к ДУД подается сигнал на перевод УВ2 в выпрямительный режим и боек после нанесения удара вновь втягивается в катушку электромагнита L2. Цикл работы длинноходового молота повторяется.

Основными режимами работы длинноходового электромагнитного молота являются:

- режим трогания подвижной части машины (бойка);
- режим перемещения бойка в исходное верхнее положение при поочередном переключении двух обмоток;
- режим замедления и останов бойка в исходном верхнем положении;
- режим рабочего хода при поочередном переключении двух обмоток (движение в обратном направлении и нанесение удара).

Движение бойка начнется с момента достижения силой тяги машины величины, равной силе сопротивления движению. От величины силы тяги машины будет зависеть длительность режима трогания, энергоемкость этого режима, и, следовательно, частота ударов КПД машины.

В режиме холостого хода боек накапливает потенциальную энергию, которая при рабочем ходе переходит в кинетическую. Величины запасенной потенциальной энергии и энергии удара прямо пропорциональны, а частота ударов – обратно пропорциональна величине хода бойка. Поэтому,

изменяя величину хода бойка, можно регулировать параметры энергии и частоты ударов. В режиме движения бойка при холостом ходе происходит преобразование энергии, потребляемой машиной в механическую, отношение этих величин характеризует эффективность энергопреобразования в каждой точке траектории движения бойка.

Режим замедления и остановки бойка при холостом ходе может происходить под действием тормозных сил сопротивления движению (вес бойка, сил трения и других), а также сил, создаваемых тормозными устройствами (механическими пружинами, воздушными буферами и другими). При этом боек совершает замедленное движение, а накопленная бойком кинетическая энергия переходит в потенциальную и частично может быть использована при рабочем ходе бойка. От момента начала режима замедления и его интенсивности зависит величина хода бойка, время замедления, а, следовательно, частота и энергия ударов машины.

Режим рабочего хода осуществляется за счет накопленной при холостом ходе потенциальной энергии, переходящей при движении в кинетическую, к которой может добавляться кинетическая энергия, обусловленная силами тяги, создаваемыми при поочередном переключении двух обмоток при рабочем ходе.

Исходная система дифференциальных уравнений для каждого из электромагнитов:

$$U = R i + \frac{d\psi(i, \delta)}{dt},$$
$$m \frac{dV}{dt} = F_3(i, \delta) - F(\delta, V), \quad (1)$$
$$m \frac{d\delta}{dt} = V,$$

где U – приложенное напряжение; R – активное сопротивление обмотки; i, ψ – мгновенные значения тока и потокосцепления обмотки; δ – воздушный зазор; m, V – масса и



скорость бойка; $F_{\text{э}}$ – сила тяги электромагнита; $F_{\text{с}}$ – сила сопротивления движению бойка.

Исследования в области динамики электромагнитных машин достаточно строго могут быть проведены при помощи математических моделей с учетом всех основных нелинейностей динамических характеристик отдельных ее элементов.

В качестве примера рассмотрим модель электромагнитного молота, который был изготовлен на кафедре электропривода и электрического транспорта ИРНИТУ с массой бойка 22 кг, активное сопротивление обмоток холостого и рабочего хода $R = 5 \text{ ом}$, экспериментально снятые статические характеристики потокоцепления и силы тяги данного молота приведены в некоторых работах.

Математическая модель молота (рис. 3) получена на основании уравнений системы (1) с использованием экспериментально снятых статических характеристик для каждой из обмоток.

Модель содержит БУ (рис. 4), два блока расчета тока (рис. 5 а) Блок1 и Блок2, два блока расчета потокоцеплений, два блока расчета силы тяги обмоток (рис 5 б), а также блок измерений (БИ), показан на рис. 6.

Блок управления организует цикл работы молота; он содержит четыре источника напряжения для осуществления выпрямительного (U_{31} , U_{32}) и инверторного ($3И1, 3И2$) режимов работы источников питания обмоток холостого и рабочего хода; релейные и пороговые элементы, обеспечивающие подключение этих источников к соответствующим обмоткам по сигналам датчиков хода и скорости бойка.

Блоки расчета тока (рис. 5 а) Блок1 и Блок2 определяют мгновенные значения токов обмоток по выражению:

$$i = [U - kV\psi(i; \delta)] \frac{1/R}{Tp + 1},$$

где k – конструктивный коэффициент молота; p – оператор Лапласа; T – электромагнитная постоянная времени обмотки молота:

$$T = \frac{L(i; \delta)}{R},$$

где $L(i; \delta)$ – индуктивность обмотки молота, определяемая как:

$$L(i; \delta) = \frac{\Psi(i; \delta)}{i}.$$

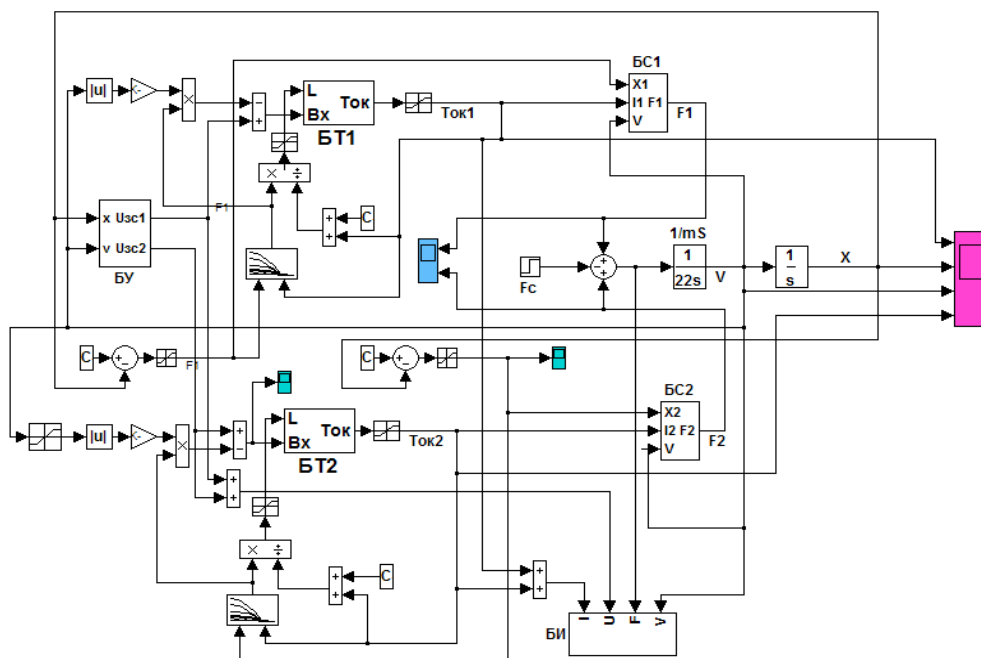


Рис. 3. Модель длинноходового электромагнитного молота
Fig. 3. Model of a long stroke electromagnetic hammer

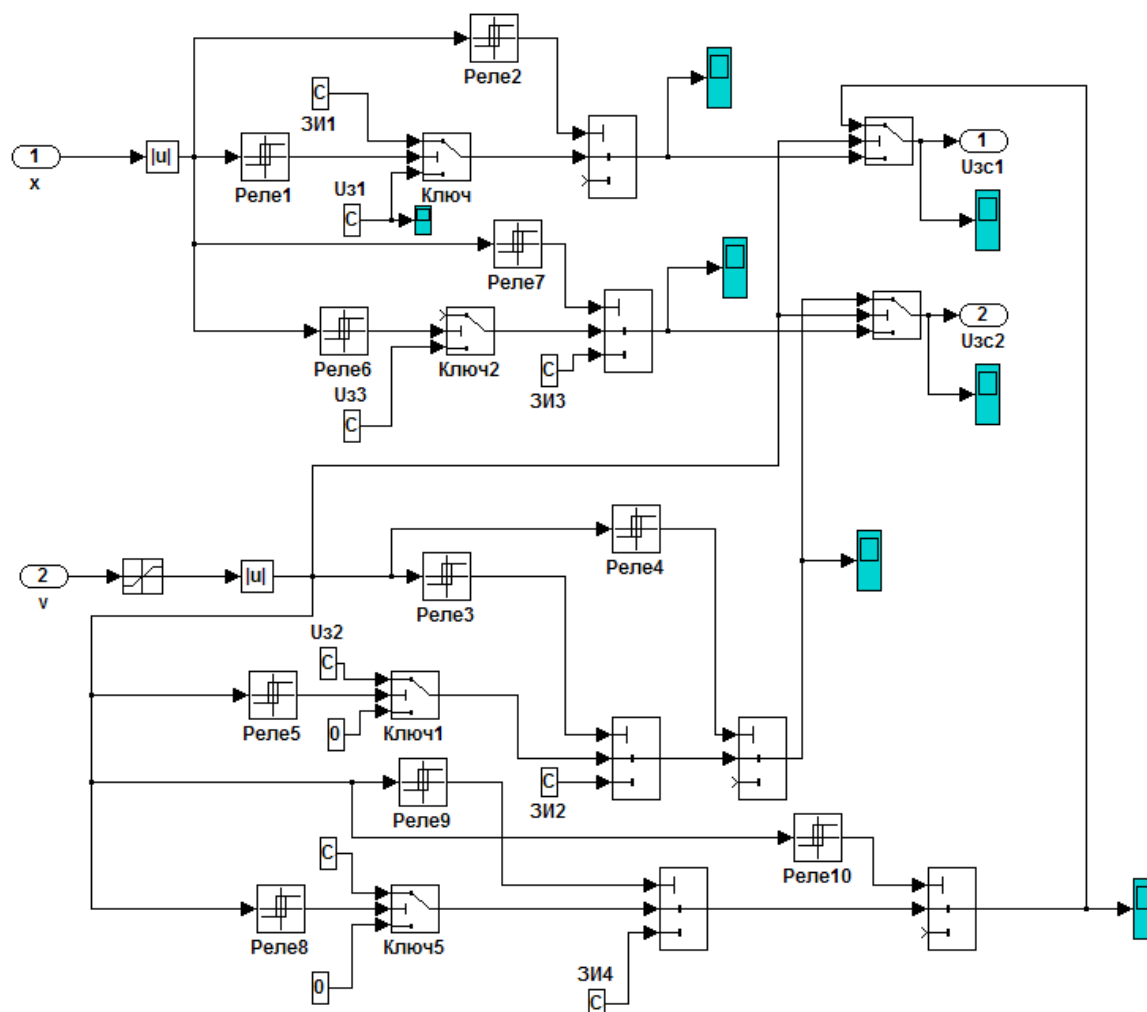


Рис. 4. Блок управления (БУ)
 Fig. 4. Control unit

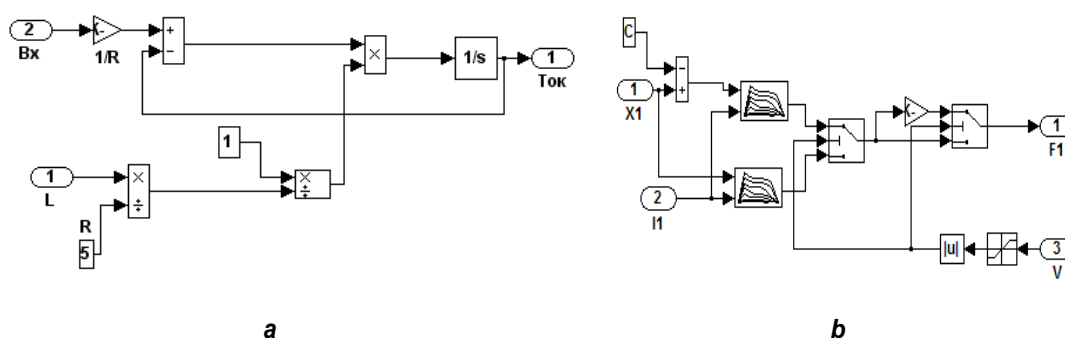


Рис. 5. Модели блоков расчета тока БТ1 и БТ2 (а) и блоков расчета силы тяги БС1 и БС2 (b)
 Fig. 5. Models of current calculation blocks CCB1 and CCB2 (a)
 and thrust force calculation blocks TFB1 and TFB2 (b)

Блок измерения (БИ) на рис. 6 позволяет определить мгновенные значения мощности, потребляемой из сети $P_1 = U_i$; мощности потерь в меди $P_{меду} = I^2 R$; механи-

ческой мощности $P_{мех} = F_P V$. Величины потребляемой из сети энергии W_1 , энергии потерь в меди $W_{меду}$, механической энергии молота $W_{мех}$ находятся путем интегрирования значений соответствующих мощностей.

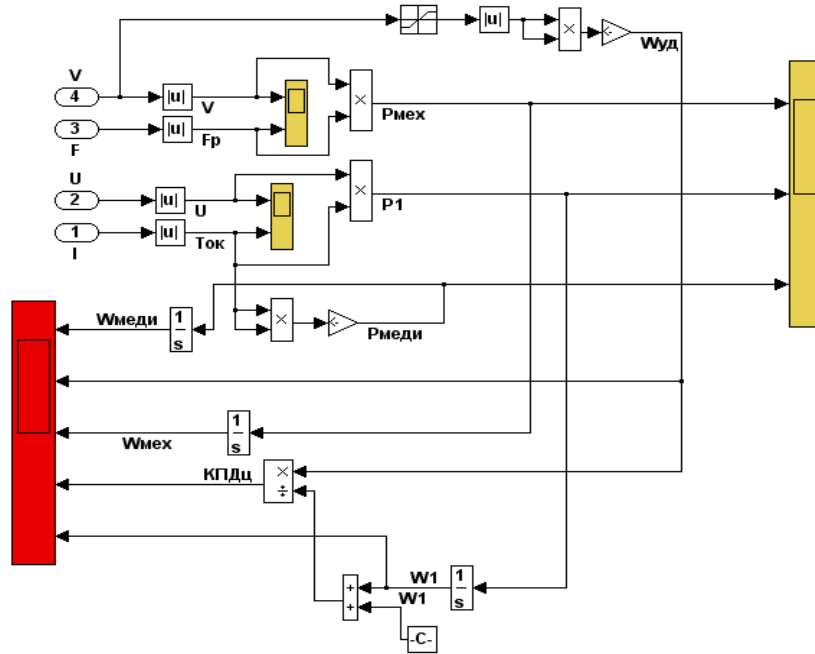


Рис. 6. Модель блока измерений БИ
Fig. 6. Measurement unit model

Результаты и их обсуждение

На рис. 7 а показаны полученные на модели осциллограммы тока нижней обмотки, скорости V , хода X бойка, тока верхней обмотки за один цикл работы длинноходового молота. На рис. 7 б показаны осцил-

лограммы тока обмотки холостого хода, скорости V и хода X бойка, а также тока обмотки рабочего хода за два цикла работы обычного молота при напряжениях $U_1 = 210\text{В}$ и $U_2 = 210\text{В}$.

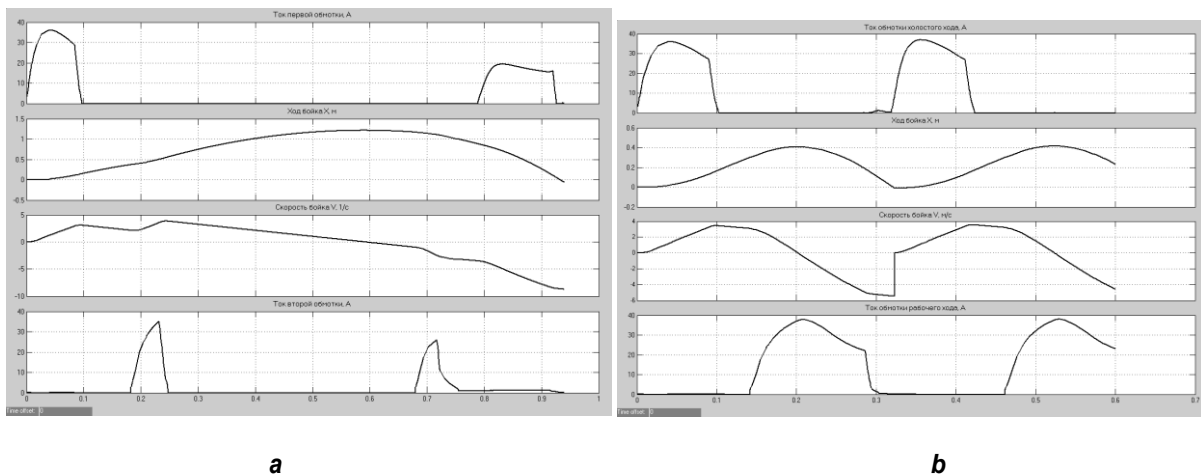


Рис. 7. Осциллограммы тока нижней обмотки, скорости V , хода X бойка, тока верхней обмотки за один цикл работы длинноходового молота (а) и тока обмотки холостого хода, скорости V , хода X бойка, тока обмотки рабочего хода за два цикла работы обычного молота при напряжениях $U_1 = 210\text{В}$ и $U_2 = 210\text{В}$ (б)

Fig. 7. Oscillograms of the lower winding current, velocity V , striker travel X , upper winding current in one operation cycle of the long stroke hammer (a) and current of the idling winding, velocity V , striker travel X , current of the stroke winding in two operation cycles of a conventional hammer at voltages of $U_1 = 210\text{В}$ and $U_2 = 210\text{В}$ (b)

Анализ полученных осциллограмм позволяет определить, что:

- высота подъема бойка у длинноходового молота составляет 1,25 м, а у обычного молота – 0,4 м;
- длительность одного цикла работы длинноходового молота составляет 0,93 с, а у обычного молота – 0,32 с;
- частота ударов длинноходового молота составляет 65 уд. в мин, а у обычного молота – 187 уд. в мин;
- суммарное время протекания тока в нижней обмотке длинноходового молота составляет 0,24 с, а в верхней обмотке – 0,1 с;
- время протекания тока в обмотке холостого хода обычного молота составляет 0,11 с, а в обмотке рабочего хода – 0,15 с;
- максимальная скорость бойка при его движении вверх у длинноходового молота составляет 3,84 м/с, а у обычного молота – 3,42 м/с;
- скорость бойка в момент удара у длинноходового молота составляет 8,7 м/с, а у обычного молота – 5,47 м/с.

На рис. 8 показаны полученные на модели величины механической мощности $P_{мех}$, потребляемой из сети мощности P_1 , мощности потерь в меди $P_{медь}$ за один цикл работы длинноходового молота (рис. 8 а) и обычного молота за два цикла работы при

напряжениях $U_1 = 210В$ и $U_2 = 210В$ (рис. 8 б).

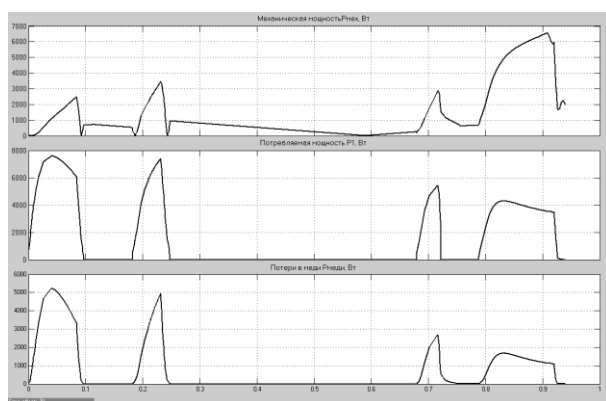
Анализ осциллограмм на рис. 8 позволяет определить:

- мгновенное значение механической мощности у длинноходового молота не превышает 6580 Вт, а у обычного молота – 5330 Вт;
- мгновенное значение потребляемой из сети мощности у длинноходового молота не превышает 7600 Вт, а у обычного молота – 8000 Вт;
- мгновенное значение мощности потерь в меди у длинноходового молота не превышает 5230 Вт, а у обычного молота – 5790 Вт.

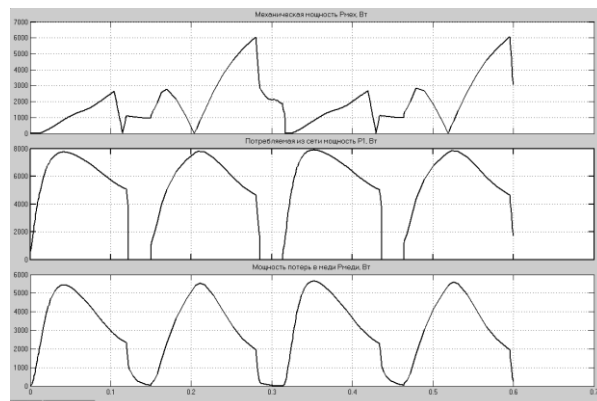
На рис. 9 показаны полученные на модели величины потерь энергии в меди $W_{медь}$, кинетической энергии при рабочем ходе $W_{уд}$, механической энергии $W_{мех}$, коэффициента полезного действия $КПД$, потребляемой из сети энергии W_1 длинноходового молота (рис. 9 а) и обычного молота за два цикла работы при напряжениях $U_1 = 210В$ и $U_2 = 210В$ (рис. 9 б).

Анализ осциллограмм на рис. 9 позволяет определить:

- потери энергии в меди обмоток (электрические потери в обмотках) за цикл работы длинноходового молота составляют 727 Дж, а у обычного молота – 900 Дж;



а



б

Рис. 8. Осциллограммы механической мощности $P_{мех}$, потребляемой из сети мощности P_1 , мощности потерь в меди $P_{медь}$ за один цикл работы длинноходового молота (а) и обычного молота за два цикла работы при напряжениях $U_1 = 210В$ и $U_2 = 210В$ (б)

Fig. 8. Oscillograms of mechanical power $P_{мех}$, power P_1 consumed from the network, power losses in copper $P_{медь}$ in one operation cycle of the long stroke hammer (а) and the conventional hammer in two operation cycles at voltages of $U_1 = 210В$ and $U_2 = 210В$ (б)

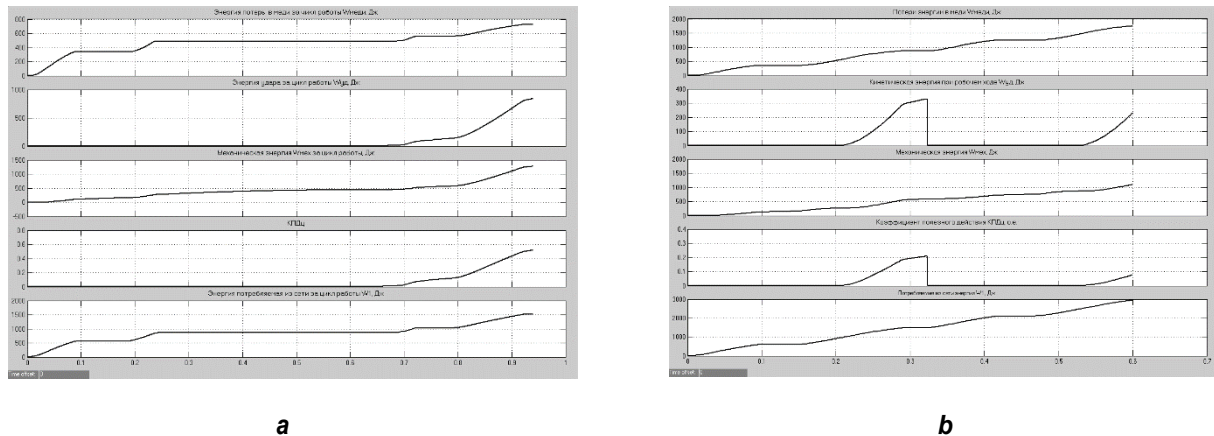


Рис. 9. Осциллограммы величины потерь энергии в меди $W_{\text{меди}}$, кинетической энергии при рабочем ходе $W_{\text{уд}}$, механической энергии $W_{\text{мех}}$, коэффициента полезного действия КПД, потребляемой из сети энергии W_1 длинноходового молота (а) и обычного молота за два цикла работы при напряжениях $U_1 = 210\text{В}$ и $U_2 = 210\text{В}$ (б)

Fig. 9. Oscillograms of the amount of energy losses in copper W_{copper} , kinetic energy in the working stroke W_{stroke} , mechanical energy W_{mech} , efficiency, network energy W_1 of the long stroke hammer (a) and the conventional hammer in two operation cycles at the voltages of $U_1 = 210\text{V}$ and $U_2 = 210\text{V}$ (b)

- энергия удара длинноходового молота составляет 842 Дж, а у обычного молота – 330 Дж;
- механическая энергия длинноходового молота составляет 1280 Дж, а у обычного молота – 330 Дж;
- потребляемая из сети энергия за

цикл работы длинноходового молота составляет 1520 Дж, а у обычного молота – 1600 Дж;

- коэффициент полезного действия длинноходового молота за цикл его работы КПД = 52%, а у обычного молота – КПД = 22%.

Заключение

Разработана математическая модель длинноходового молота с использованием экспериментально снятых статических характеристик потокосцепления и силы тяги для каждой из обмоток, получены осциллограммы токов нижней и верхней обмоток скорости и хода бойка. Получены величины потребляемой из сети энергии, мощности потерь в меди, определяющие нагрев молота и энергию удара, а также коэффициента полезного действия за цикл работы молота. Проведено сравнение технических и энергетических показателей работы длинноходового и обычного молота.

Исследования показали, что высота подъема бойка у длинноходового молота в 3,125 раза больше, чем у обычного; один цикл работы длинноходового молота в 2,9 раза превышает по длительности один цикл работы обычного молота; частота ударов длинноходового молота в 2,88 раза меньше,

чем у обычного; скорость бойка в момент удара у длинноходового молота в 2,36 раза больше, чем у обычного.

Потери энергии в меди обмоток за цикл работы длинноходового молота в 1,24 раза меньше, нежели у обычного; энергия удара длинноходового молота в 2,55 раза больше, чем у обычного; потребляемая из сети энергия за цикл работы длинноходового молота в 1,05 раза меньше, чем у обычного; коэффициент полезного действия длинноходового молота за цикл его работы в 2,36 раза больше, чем у обычного.

Таким образом, длинноходовой режим работы обычного молота может быть использован для повышения эффективности его работы. При этом значения энергии ударов и коэффициента полезного действия длинноходового молота существенно возрастают, частота ударов снижается, а нагрев машины практически не изменяется.

Библиографический список

1. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Федонин В.Н., Малов А.Т. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями. Новосибирск: Наука, 1981. 150 с.
2. Малов А.Т., Ряшенцев Н.П., Малахов А.П., Антонов А.Н., Носовец А.В. Электромагнитные молоты. Новосибирск: Наука, 1979. 268 с.
3. Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Исторические этапы в развитии конструкций электромагнитных двигателей как отдельного класса машин с линейным электроприводом // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 3-1. С. 59–62.
4. Хабаров Д.А., Симонов Б.Ф., Погарский Ю.В. Анализ систем охлаждения электромагнитного молота МЭМ-400 // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. Т. 3. № 2. С. 211–216.
5. Шабанов А.С., Пауль О.Э., Лаппи Ф.Э. Анализ показателей редкоударных электромагнитных машин // Роль технических наук в развитии общества: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. 2017. (г. Кемерово, 6 марта 2017 г.). Кемерово, 2017. С. 247–251.
6. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. О вводе сторонней механической энергии в импульсный линейный электро-механический преобразователь // Вопросы электро-технологии. 2015. № 3 (8). С. 77–84.
7. Шестаков И.Я., Фисенко Е.Н., Ремизов И.А. Особенности работы электродинамического молота // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2014. № 2 (54). С. 85–88.

8. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Продолжительность включения линейного электромагнитного двигателя в приводе технологического оборудования // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. 2016. № 3 (42). С. 84–87.
9. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Энергетические режимы импульсных линейных электромагнитных двигателей // Автоматизированный электропривод АЭП-2016: материалы XI Междунар. (XX Всеросс.) конф. (г. Пермь, 3–7 октября 2016 г.). Пермь, 2016. С. 71–76.
10. Kwon Y.W. The Finite Element Method Using MATLAB. Boca Raton a. o.: CRC Press, 1997. 519 p.
11. Шабанов А.С., Аксютин В.А. К решению задачи повышения точности расчета выходных показателей электромагнитных машин // Наука, техника и образование. 2015. № 12 (18). С. 49–52.
12. А. с. № 1388556, Российская Федерация. Система регулирования электромагнитного молота / С.С. Леоненко, В.Е. Павлов, А.В. Носовец, А.Т. Малов; опубл. 15.12.1987.
13. Шестаков И.Я., Фисенко Е.Н., Ремизов И.А. Особенности работы электродинамического двигателя в приводе технологического оборудования // Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки. 2016. № 3 (42). С. 84–87.
14. Афанасьев А.И., Костенчук С.Ф., Саитов В.И., Чиркова А.А. Оценка эффективности работы электромагнитного молота // Горное оборудование и электромеханика. 2006. № 10. С. 12–14.

References

1. Ryashencev N.P., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malov A.T. *Elektroprivod s linejnymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electric drive with linear electromagnetic motors]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981, 150 p. (In Russ.).
2. Malov A.T., Ryashencev N.P., Malahov A.P., Antonov A.N., Nosovec A.V. *Elektromagnitnye moloty* [Electromagnetic hammers]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979, 268 p. (In Russ.).
3. Nejman L.A., Nejman V.Yu., Shabanov A.S. Historical stages in the development of electromagnetic motor designs as a specific class of machines with a linear electric drive. *Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk*, 2015, no. 3-1, pp. 59–62. (In Russ.).
4. Habarov D.A., Simonov B.F., Pogarskij Yu.V. Analysis of cooling system in electromagnetic hammer mem-400. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk* [Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 3, no. 2, pp. 211–216. (In Russ.).
5. Shabanov A.S., Paul' O.E., Lappi F.E. *Analiz pokazatelej redkoudarnyh elektromagnitnyh mashin* [Analysis of rare-impact electromagnetic machine indicators]. *Sbornik materialov II Mezhhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 2017 "Rol' tekhnicheskikh nauk v*

- razviti obshchestva*" [Proceedings of II International scientific and practical conference 2017. The role of technical sciences in the development of society", Kemerovo, 6 March 2017]. Kemerovo, 2017, pp. 247–251. (In Russ.).
6. Moshkin V.I., Ugarov G.G. On the input of applied mechanical energy in the pulse linear electromechanical converter. *Voprosy elektrotekhnologii*, 2015, no. 3 (8), pp. 77–84. (In Russ.).
7. Shestakov I.Ya., Fisenko E.N., Remizov I.A. Work features of electrodynamic hammer. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2014, no. 2 (54), pp. 85–88. (In Russ.).
8. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Duty rating of electromagnetic motor in the drive system of technological equipment. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 3 (42), pp. 84–87. (In Russ.).
9. Moshkin V.I., Ugarov G.G. *Energeticheskie rezhimy impul'snyh linejnyh elektromagnitnyh dvigatelej* [Power modes of pulse linear electromagnetic engines]. *Materialy XI Mezhhdunarodnoj (XX Vserossijskoj) konferencii "Avtomatizirovannyj elektroprivod AEP-2016"* [Proceed-



ings of XI International (XX All-Russian) conference "Automated electric drive AEP-2016", Perm', 3–7 October 2016]. Perm', 2016, pp. 71–76. (In Russ.).

10. Kwon Y.W. The Finite Element Method Using MATLAB. Boca Raton a. o.: CRC Press Publ., 1997, 519 p.

11. Shabanov A.S., Aksyutin V.A. To solution of the problem of improving the calculation accuracy of output parameters of electromagnetic machines. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2015, no. 12 (18), pp. 49–52.

12. Leonenko S.S., Pavlov V.E., Nosov A.V., Malov A.T. *Sistema regulirovaniya elektromagnitnogo molota*

[Electromagnetic hammer control system]. Copyright certificate RF, no. 1388556, 1987.

13. Shestakov I.Ya., Fisenko E.N., Remizov I.A. Features of electrodynamic motor operation in the drive of technological equipment. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 3 (42), pp. 84–87. (In Russ.).

14. Afanas'ev A.I., Kostenchuk S.F., Saitov V.I., Chirkova A.A. Electromagnetic hammer efficiency estimation. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2006, no. 10, pp. 12–14. (In Russ.).

Критерии авторства

Павлов В.Е. провел исследование режимов работы длинноходового электромагнитного двухкатушечного молота с увеличенной скоростью боя и энергией удара. Автор получил и оформил научные результаты, и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Pavlov V.E. has studied the operation modes of a long stroke electromagnetic two-coil hammer with increased striker velocity and impact energy. The author has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлов Владимир Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; e-mail: pvew52@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir E. Pavlov

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664033, Russia; e-mail: pvew52@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 624.21.093.001

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-271-284>

Математическое обоснование эффективности бесшовного кольцевого соединения несущих элементов многослойных цилиндрических корпусов для сосудов давления и реакторов

© П.Г. Пимштейн*, Д.А. Еловенко**

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

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

Резюме: Цель – обосновать аналитическим путем и подтвердить экспериментально эффективность и технологичность бесшовного кольцевого соединения с трением многослойных цилиндрических компонентов (царг) корпусов для сосудов давления и реакторов. Используются аналитические методы теории упругости деформируемых оболочек, а также многослойных и монолитных цилиндрических тел. Предложен метод определения достаточной ширины соединения двух многослойных цилиндрических элементов (царг) для обеспечения технологичности и работоспособности соединения, а также получена математическая модель для оценки параметров условия его прочности. Показано, что расчетный коэффициент трения полностью зависит от плотности навивки смежных (соединяемых) многослойных цилиндрических элементов. Полученный метод опробован на промышленном сосуде высокого давления, в результате этого получено условие кольцевой прочности. Определено очевидное преимущество кольцевого соединения с трением перед сварочными кольцевыми соединениями.

Ключевые слова: кольцевое соединение с трением, многослойный цилиндр, коэффициент трения, напряжение

Информация о статье: Дата поступления 14 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Пимштейн П.Г., Еловенко Д.А. Математическое обоснование эффективности бесшовного кольцевого соединения несущих элементов многослойных цилиндрических корпусов для сосудов давления и реакторов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 271–284. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-271-284.

Mathematical justification of seamless ring joint efficiency of multilayer cylindrical shell bearing elements for pressure vessels and reactors

Pavel G. Pimshtein, Denis A. Elovenko

Irkutsk NITIMash, Irkutsk, Russia

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The paper analytically justifies and experimentally proves the efficiency and manufacture ease of seamless ring joint with friction of the multilayer cylinder shells for pressure vessels and reactors. The study uses the analytical methods of the theory of elasticity of deformable shells, as well as multilayer and monolithic cylindrical bodies. A method is proposed for determining the sufficient width of the joint of two multilayer cylinder shells to ensure joint efficiency and manufacture ease. A mathematical model is obtained to estimate the parameters of its strength condition. It is shown that the calculated friction coefficient totally depends on the winding density of adjacent (joined) multilayer cylindrical elements. The designed method is tested on the industrial high-pressure vessel, as a result, the condition of ring strength has been obtained. The obvious advantage of a ring joint with friction over welding ring joints is determined.

Keywords: friction ring joint, multilayer cylinder, friction coefficient, stress

Information about the article: Received February 14, 2019; accepted for publication March 12, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Pimshtein P.G., Elovenko D.A. Mathematical justification of seamless ring joint efficiency of multilayer cylindrical shell bearing elements for pressure vessels and reactors. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 271–284. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-271-284.

Введение

Механические соединения различных узлов и деталей по средствам, возникающих в контактных поверхностях сил трения, имеют широкое распространение в машиностроении. Такие соединения способны воспринимать существенные нагрузки в процессе работы (эксплуатации) различного оборудования и машин, сохраняя их форму, технологические характеристики, обеспечивая требуемые условия их прочности и ресурса. Развитие методов и технологии применения соединений узлов и деталей с трением (для цилиндрических корпусов сосудов высокого давления), а также энергетических реакторов является актуальной проблемой. Ее решение позволит создать новые конструкции более технологичных цилиндрических корпусов сосудов высокого давления и энергетических реакторов.

Далее коротко приводим результаты известных исследований проблемы моделирования и анализа контактных соединений узлов и деталей с трением в различных конструкциях, преимущества в технологичности и функциональности которых, в первом приближении, могут быть сопоставимы с нашим объектом исследования.

Изопараметрический конечный элемент трения для анализа связей между слоистыми композитными пластинами представлен в работе [1]. Элемент трения основан на простой регуляризации одностороннего контакта с ортотропной проблемой кулоновского трения. В отличие от известных узловых элементов зазора, предлагаемый элемент применяет законы контакта и трения равномерно по контактной поверхности трения, независимо от степени дискретизации конечно-элементной сетки или искажения элемента.

Известна также модель болтового соединения, предусматривающая замену жесткого трения упругими связями [2]. В этом исследовании напряжения в комплексных соединениях металлического моста определяются экспериментальным способом.

В работе [3] экспериментально показано, что эффект внешней силы на номинально неподвижное фрикционное соединение вызывает его динамическое саморегулирование трибосистемы. Самонастройка системы направлена на минимизацию потерь энергии и уровня относительных сил инерции, которые действуют в системе. Самонастройка обеспечивается за счет инерционно-фрикционных обратных связей, использующих различные степени свободы (находящихся в контакте), деформируемых твердых тел.

В статье [4] представлено скользящее шарнирное соединение балки и колонны с низким уровнем повреждений, используемое в стальных противоударных рамах. Это позволяет обеспечить большее вращение колонны-балки с минимальным повреждением через скольжение в асимметричных фрикционных соединениях. Авторами разработано самоцентрирующееся скользящее шарнирное соединение, включающее кольцевые пружины, установленные на нижнем фланце балки, для улучшения динамических свойств повторного центрирования и повышения степени их работоспособности.

В [5] сделана обобщенная оценка влияния толщины элементов конструкции, соединенных многоболтовыми фрикционными соединениями (на несущую способность соединения). Отметим, что различные толщины конструктивных элементов, соединенных фрикционными соединениями с несколькими болтами, оказывают как качественное, так и количественное влияние на напряженно-деформированное состояние соединения. Авторы работы [5] представляют результаты экспериментальных испытаний образцов связанных пластин, толщина которых варьируется от 1,5 мм до 5 мм. Продемонстрирована существенная зависимость несущей способности фрикционных соединений стальных пластин от толщины и разницы толщин соединяемых пластин.

Автор исследования [6] представляет математическую модель фрикционных соединений, основанную на дифференциальных уравнениях и описывающую различные способы совместных связей. Также методом линейных уравнений сравниваются известные и новые резуль-



таты исследований. Другая работа этого автора [7] также описывает расчет модели фрикционных соединений конструкций на основе развития предыдущего исследования. Продолжение его исследования рассматривает систему из двух пластин, связанных фрикционным соединением [8], которое проходит через промежуточные стадии от упругой работы до полного смещения. Здесь рассчитаны диаграммы сил и относительных смещений от размеров скольжения. Также получены решения для всей области функционирования соединения под различной нагрузкой.

Продолжение исследования [4]: представлено 10 тестов на самоцентрирующемся узле скользящего шарнирного соединения [9]. Избыточная способность конструкции была получена с помощью комбинации кольцевых пружин и асимметричных соединений с трением, соотношение которых варьировалось между испытаниями. Развитие этих работ [10] представляет собой 60 натурных испытаний, проведенных для улучшения метода, называемых момент-сдвиг-осевой силы модели болтов и метод эффективного коэффициента трения для осесимметричного фрикционного соединения с прокладками из стали высокой твердости. По мнению авторов, оба метода можно применять в проектировании, так как их результаты в значительной степени похожи. Последним исследованием осесимметричного фрикционного соединения на используемой Н.Н. Кхоо в своих работах конструкции является экспериментальная и количественная оценка эффективного динамического коэффициента трения как функции силы зажима соединения от крутящего момента прижимного болта и входного смещения с использованием крутящих моментов от 20 до 500 Нм, и серии синусоидальных входных движений [11]. Удлинение прижимного болта и соответствующее зажимное усилие оценивают с помощью измеренной резистивной силы скольжения в соединениях для получения динамического коэффициента трения. Результаты этого исследования показывают, что трение слабо зависит от амплитуды входного движения. Оно зависит более существенно от направления для всех крутящих моментов с большими коэффициентами трения в положительном направлении натяжения входного движения. В заключении этой работы даются обобщенные конструкторские рекомендации, которые могут иметь широкое применение для аналогичных соединений с трением.

Описанные выше исследования, так или иначе, имеют только косвенную связь с нашей работой. Более близким к ней в идейном и, отчасти, в функциональном отношении является кольцевое соединение с трением составных цилиндрических элементов башни для ветровых энергетических установок [12]. Такие соединения имеют существенные, главным образом технологические преимущества перед фланцевыми. Также экспериментально установлена их более высокая усталостная прочность. Авторами исследуется потеря сил предварительного натяжения в соединении с трением с помощью кратковременных и долгосрочных статических испытаний сегмента, усталостных испытаний, испытаний на изгиб с помощью лабораторного образца, использованного в технико-экономическом обосновании. Развитием этой работы является более позднее исследование [13], в котором сравниваются производительность фланцевого соединения и кольцевого соединения с трением диаметром 3,37 м и толщиной корпуса 24 мм. Сравнительный анализ реализован методом конечных элементов и полностью подтверждает полученные ранее экспериментальные данные, а конструкторские (проектировочные) рекомендации даны для обобщенных результатов в приложении к численной модели кольцевого соединения с трением.

Таким образом, очевидно, что существуют различные альтернативы сварным соединениям, которые зачастую являются чрезмерно «жесткими» и крайне нетехнологичными в вопросах сборки отдельных массивных компонентов конструкций.

Из этих же позиций в нашем исследовании будем исходить и мы. Нашей целью является попытка обосновать технологичность новой конструкции бесшовного (не имеющего сварных зон) кольцевого соединения многослойных цилиндрических компонентов (царг) с трением для несущих элементов многослойных цилиндрических корпусов сосудов высокого давления и реакторов.

Поведение изогнутой консольной многослойной балки с учетом сил трения

Рассмотрим сначала консольную балку длиной l шириной b , составленную из n слоев толщиной h и нагруженную на конце силой P . Прогиб монолитной балки равен¹ [14]

$$U_0 = \frac{Pl^3}{3EJ_0}. \quad (1)$$

Если силы трения между слоями полностью воспринимают касательные напряжения, то балку можно рассматривать как однослойную, толщиной nh . Осевой момент инерции поперечного сечения равен¹ [14]

$$J_0 = \frac{b(nh)^3}{12}. \quad (2)$$

Если силы трения отсутствуют, то каждый слой балки работает автономно, общий момент инерции многослойной балки равен сумме моментов инерции каждого слоя

$$J_{\text{м}} = \frac{n \cdot bh^3}{12} = \frac{J_0}{n^2}, \quad (3)$$

и прогиб многослойной балки равен¹ [14]

$$U_{\text{м}} = \frac{Pl^3}{3EJ_{\text{м}}} = \frac{Pl^3 n^2}{3EJ_0} = n^2 U_0. \quad (4)$$

То есть при заданной силе стрела прогиба многослойной балки без трения в n^2 раз больше, чем в балке, где силы трения полностью воспринимают касательные напряжения.

Аналогичным образом в бесконечной многослойной цилиндрической оболочке, нагруженной по краю силой q_0 , перемещение края оболочки, если силы трения полностью воспринимают касательные напряжения:

$$W_0 = \frac{q_0}{2\kappa^3 D}, \quad (5)$$

где $\kappa = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{RS_0}}, \quad D = \frac{ES_0}{12(1-\mu^2)}, \quad S_0 = nS.$

Поведение фрикционного кольцевого соединения в многослойном цилиндре

В многослойной цилиндрической стенке без трения между слоями каждый слой работает автономно, и общее перемещение равно перемещению каждого слоя от силы q_0/n

¹Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1988, 736 с. / Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev Handbook on Materials Resistance. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1988, 736 p.



$$W_m = \frac{q_0}{2n\kappa_c^3 D_c}, \quad (6)$$

где $\kappa_c = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{RS}}, \quad D_c = \frac{ES^3}{12(1-\mu^2)}.$

Таким образом,

$$W_0 = \frac{2q_0(R^{2/3})^4 \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{ES^{3/2}n^{3/2}}, \quad (7)$$

$$W_m = \frac{2q_0(R^{2/3})^4 \sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{ES^{3/2}n}, \quad (8)$$

и перемещения края многослойной стенки (оболочки) без трения между слоями в \sqrt{n} больше, чем перемещения монолитной стенки.

Рассмотрим несущую часть многослойного цилиндрического корпуса, в котором две многослойные обечайки соединены между собой не кольцевым сварочным швом, а кольцевым соединением с трением (рис. 1). В такой конструкции вся осевая сила воспринимается силами трения между слоями:

$$\sum_{i=1}^{n-1} l 2\pi r_i |\sigma_{ri}| f \geq p_0 \pi r_0^2. \quad (9)$$

Полагая приближенно радиальные напряжения в многослойном цилиндре равными

$$|\sigma_{ri}| = \frac{ap_0}{\beta^2 - 1} \left(\frac{R^2}{r_i^2} - 1 \right), \quad (10)$$

где b – коэффициент плотности прилегания слоев ($b \leq 1$). Получим условие прочности соединения с трением в виде:

$$l \geq \frac{r_0^2 (\beta^2 - 1)}{2af \sum_{i=1}^{n-1} (R^2 / r_i^2 - 1) \cdot r_i}. \quad (11)$$

Заменим приближенно сумму интегралом:

$$\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{R^2}{r_i^2} - 1 \right) \cdot r_i S \approx \frac{1}{S} \int_{r_1}^R \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) r dr = \frac{1}{S} \left(R^2 \ln \frac{R}{r_1} - \frac{R^2 - r_1^2}{2} \right). \quad (12)$$

На рис. 1 показана конструкция кольцевого соединения с трением для рулонированной (закрученной по спирали Архимеда) конструкции многослойного цилиндра, полученная сворачиванием двойного полотнища (стальной ленты).

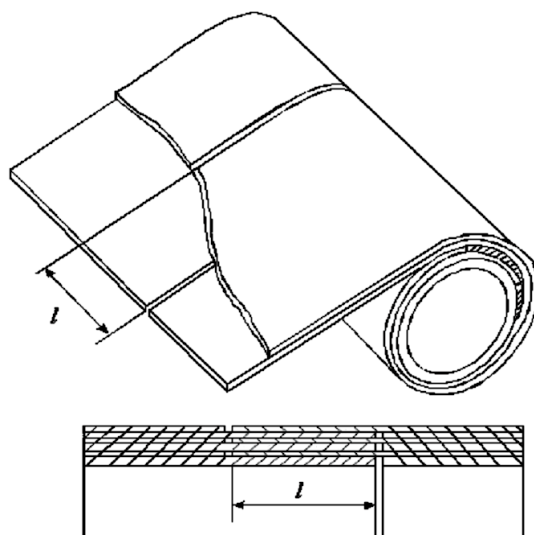


Рис. 1. Кольцевое соединение двух обечаек
 Fig. 1. Ring joint of two shells

При концентрическом наложении слоев такую конструкцию получить еще более просто. Такая конструкция полностью снимает проблему чрезмерной конструктивной жесткости кольцевых сварных швов с сопутствующими им высокими изгибающими напряжениями на внутреннем слое [15–20].

Используя еще одно приближенное соотношение:

$$\ln \frac{R}{r_1} \approx \frac{R^2 - r_1^2}{R^2 + r_1^2}, \quad (13)$$

получим условие прочности фрикционного кольцевого соединения:

$$l \geq \frac{S}{af} \frac{(\beta^2 - 1)(R^2 + r_1^2)}{(\beta^2 - \beta_1^2)(R^2 - r_1^2)} = \frac{r_0}{af} \frac{S}{(R - r_1)} \frac{(\beta^2 - 1)(\beta^2 + \beta_1^2)}{(\beta^2 - \beta_1^2)(\beta + \beta_1)} = \frac{r_0}{afn} \frac{(\beta^2 - 1)(\beta^2 + \beta_1^2)}{(\beta^2 - \beta_1^2)(\beta + \beta_1)}, \quad (14)$$

или

$$l \geq \frac{r_0^2 (\beta^2 - 1)}{2af \sum_{i=1}^{n-1} (R^2 / r_i^2 - 1) \cdot r_i} \approx \frac{r_0}{2bf n} \frac{(\beta^2 - 1)(\beta^2 + \beta_1^2)}{(\beta^2 - \beta_1^2)(\beta + \beta_1)}, \quad (15)$$

здесь a – коэффициент уменьшения контактных давлений; f – коэффициент трения.

Заметим, что величина l зависит от давления только через коэффициент толстостенности (отношения наружного диаметра к внутреннему). Для колонны синтеза аммиака при $\beta = 1,2$, $r_0 = 1200$, $\beta_1 = 1,02$, $n = 43$, $af = 0,1$ достаточно перекрыть слои на величину:

$$l = \frac{r_0}{afn} \frac{(\beta^2 - 1)(\beta^2 + \beta_1^2)}{(\beta^2 - \beta_1^2)(\beta + \beta_1)} = \frac{1200}{0,1 \cdot 43} \frac{(1,44 - 1)(1,44 + 1,04)}{(1,44 - 1,04)(1,2 + 1,02)} = 342 \text{ мм},$$

чтобы обеспечить осевую прочность конструкции без кольцевых сварных швов только за счет сил трения.



В качестве еще одного примера рассмотрим роль сил трения в рулонированной оболочке, образованной навивкой ленты по спирали Архимеда (рис. 2).

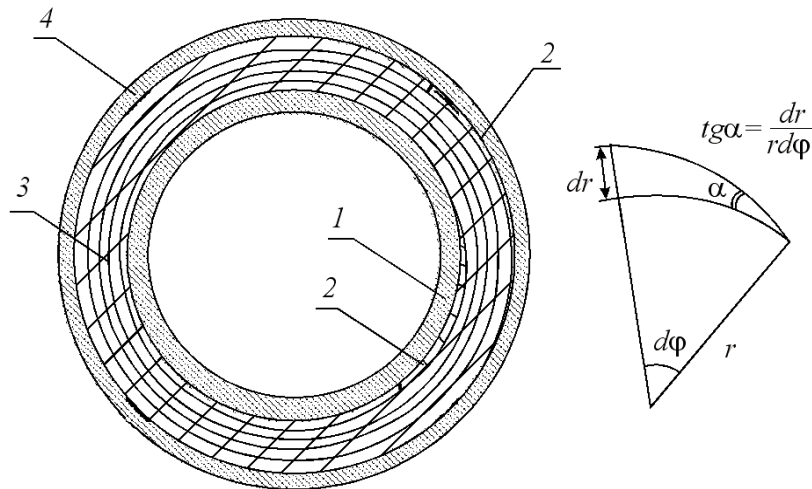


Рис. 2. Поперечное сечение рулонированной (навитой ленты по спирали Архимеда) оболочки:
1 – центральная обечайка, 2 – клиновые вставки, 3 – навивка, 4 – наружный кожух
Fig. 2. Cross-section of the scroll shell (band wound in Archimedean spiral):
1 – central shell, 2 – wedge inserts, 3 – winding, 4 – outer casing

Если силы трения между слоями отсутствуют, то незамкнутые слои сопротивляются только изгибу, а всю кольцевую силу воспринимают только центральная обечайка и последний замкнутый виток. В действительности на поверхности слоев действуют силы трения, величина которых определяется коэффициентом трения f и радиальными напряжениями σ_r . Очевидно, что касательные напряжения τ , воспринимаемые силами трения, должны удовлетворять условию

$$\tau < f |\sigma_r|. \quad (16)$$

Для оценки сил трения, исключаящих проскальзывания слоев в рулонированной оболочке, рассмотрим касательные напряжения, возникающие в однослойной оболочке на воображаемой поверхности, которая соответствует поверхности, разделяющей слои рулонированной оболочки без учета центральной обечайки и последнего замкнутого витка. В сечении, перпендикулярном оси оболочки, эта поверхность дает спираль Архимеда:

$$r = (S/2\pi)\varphi, \quad (17)$$

где r – текущий радиус; S – толщина спиральной навивки; φ – угол в полярных координатах.

Поскольку угол α между нормалью к спирали Архимеда и радиусом-вектором с координатой φ равен

$$\alpha = \arctg \frac{dr}{rd\varphi} = \arctg \frac{1}{\varphi} \rightarrow \tg \alpha = \frac{1}{\varphi}, \quad (18)$$

напряжения, действующие на площадке, наклоненной под углом α к главным направлениям t и r , будут равны

$$\begin{aligned}\sigma_{t1} &= \sigma_t \cos^2 \alpha + \sigma_r \sin^2 \alpha, \\ \tau &= (\sigma_r - \sigma_t) \sin \alpha \cos \alpha.\end{aligned}\quad (19)$$

Выражая $\sin \alpha \cos \alpha$ через $\operatorname{tg} \alpha$, получим

$$\sin \alpha \cos \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} = \frac{1/\varphi}{1 + 1/\varphi^2} = \frac{\varphi}{1 + \varphi^2} \approx \frac{1}{\varphi}.\quad (20)$$

Касательные напряжения на поверхности спирали равны:

$$\tau = (\sigma_r - \sigma_t) \sin \alpha \cos \alpha = \frac{(\sigma_r - \sigma_t)}{\varphi}.\quad (21)$$

Условие (16), исключающее проскальзывание витков, можно записать в виде:

$$f \geq \frac{\sigma_t - \sigma_r}{\varphi |\sigma_r|} = \frac{(\sigma_t - \sigma_r) S}{2\pi r |\sigma_r|},\quad (22)$$

где S – толщина спиральной навивки.

Если предположить, что кольцевые и радиальные напряжения описываются формулами Ляме, то выражение (22) можно привести к виду:

$$f \geq \frac{1}{2\pi K(1 - KS/R) \cdot (1 - KS/2R)},\quad (23)$$

где K – номер слоя, начиная с наружного; R – наружный радиус оболочки (обечайки).

Из полученной формулы видно, что работоспособность навитой по спирали Архимеда многослойной конструкции (рулонированной оболочки) полностью зависит от сил трения. Максимальный коэффициент трения, обеспечивающий работу многослойной рулонированной оболочки без проскальзывания слоев, должен быть под наружным слоем при $K = 1$.

При очень тонких слоях ($S/R \rightarrow 0$) приходим к соотношению

$$f \geq 1/2\pi = 0,16.\quad (24)$$

Поскольку коэффициент трения стали по стали больше 0,16, казалось бы, проблемы проскальзывания в многослойной рулонированной оболочке не существует. Но в действительности это не так. Вследствие контактной податливости и технологических зазоров между слоями кольцевые и радиальные напряжения в многослойной оболочке не подчиняются формулам Ляме, причем радиальные напряжения в неплотных местах могут принимать нулевые значения, и условие (16) заведомо не будет выполняться.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния многослойных рулонированных оболочек показали, что проскальзывания слоев наблюдаются даже в плотно навитых оболочках и вместе с силами трения играют существенную роль в распределении напряжений по толщине стенки. Обычно предполагают, что слои всюду плотно прилегают друг к другу по расчетной поверхности $F_{расч}$, силы трения между ними определяются расчетным коэффициентом трения $f_{расч}$ и радиальными напряжениями $\sigma_r^{расч}$. В действительности прилегание слоев осуществляется по фактической поверхности $F_{факт}$, а силы трения определяются фактическим коэффициентом трения $f_{факт}$ и радиальными напряжениями $\sigma_r^{факт}$.



Очевидно, что для суммарных сил трения должно выполняться равенство:

$$\int_{F_{\text{факт}}} f_{\text{факт}} \cdot \sigma_r^{\text{факт}} dF_{\text{факт}} = \int_{F_{\text{расч}}} f_{\text{расч}} \cdot \sigma_r^{\text{расч}} dF_{\text{расч}}, \quad (25)$$

откуда расчетный коэффициент трения равен

$$f_{\text{расч}} = f_{\text{факт}} \frac{\int_{F_{\text{факт}}} \sigma_r^{\text{факт}} dF_{\text{факт}}}{\int_{F_{\text{расч}}} \sigma_r^{\text{расч}} dF_{\text{расч}}}. \quad (26)$$

Если фактические радиальные напряжения в слое постоянны и не больше расчетных, то очевидно, что расчетный коэффициент трения полностью зависит от плотности навивки рулонированной оболочки:

$$f_{\text{расч}} \leq f_{\text{факт}} \cdot \frac{F_{\text{факт}}}{F_{\text{расч}}}. \quad (27)$$

Коэффициент трения f можно с большим запасом принять равным 0,2. Коэффициент уменьшения контактных давлений можно оценить по формуле

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} p_i^{\text{МН}}}{\sum_{i=1}^{n-1} p_i^{\text{Ляме}}}. \quad (28)$$

Формула (15) выведена «в запас» для демонстрации эффективности фрикционного кольцевого соединения, без учета центральной обечайки (тонкостенного цилиндра) и наружного кожуха, которые также воспринимают осевые силы. Учет их существенно уменьшает необходимую длину перекрытия несвариваемых слоев. С учетом центральной обечайки и наружного кожуха условие осевой прочности фрикционного кольцевого соединения принимает вид:

$$\sum_{i=1}^{n-1} 2\pi r_i l f a p_i^{\text{Ляме}} + [\sigma] \pi (R^2 - r_{n-1}^2 + r_1^2 - r_0^2) \geq \pi r_0^2 p_0. \quad (29)$$

Учитывая, что

$$p_0 = [\sigma] \ln \beta, \quad [\sigma] = \frac{p_0}{\ln \beta}, \quad p_i^{\text{Ляме}} = \frac{p_0}{\beta^2 - 1} \left(\frac{R^2}{r_i^2} - 1 \right), \quad (30)$$

условие (29) записываем в виде:

$$\frac{2lfa}{\beta^2 - 1} \sum_{i=1}^{n-1} r_i \left(\frac{R^2}{r_i^2} - 1 \right) + \frac{(R^2 - r_{n-1}^2 + r_1^2 - r_0^2)}{\ln \beta} \geq r_0^2. \quad (31)$$

Сумму при большом числе тонких слоев можно заменить интегралом:

$$\frac{1}{s} \sum_{i=1}^{n-1} r_i \left(\frac{R^2}{r_i^2} - 1 \right) s \cong \int_{r_1}^{r_{n-1}} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) r dr = \frac{1}{2s} \left[R^2 \ln \frac{r_{n-1}^2}{r_1^2} - (r_{n-1}^2 - r_1^2) \right]. \quad (32)$$

Подставляя полученное выражение в условие прочности, и разделив обе части неравенства на r_0^2 , получим

$$\frac{af l}{s(\beta^2 - 1)} \left[\beta^2 \ln \frac{\beta_{n-1}^2}{\beta_1^2} - (\beta_{n-1}^2 - \beta_1^2) \right] + \frac{1}{\ln \beta} (\beta^2 - \beta_{n-1}^2 + \beta_1^2 - 1) \geq 1 \quad (33)$$

Отсюда

$$l \geq \frac{s}{af} \frac{(\ln \beta - \beta^2 + \beta_{n-1}^2 - \beta_1^2 + 1)(\beta^2 - 1)}{\ln \beta [\beta^2 \ln(\beta_{n-1}^2 / \beta_1^2) - (\beta_{n-1}^2 - \beta_1^2)]}. \quad (34)$$

Теперь условие прочности для фрикционного кольцевого соединения дает нам величину

$$l \geq \frac{5}{0,1 \ln 1,2} \frac{(\ln 1,2 - 1,44 + 1,42 - 1,0506 + 1)(1,44 - 1)}{(1,44 \ln(1,42 / 1,0506) - (1,42 - 1,0506))} = 209 \text{ мм.}$$

Обоснование эффективности ФКС

Работоспособность и прочность этой конструкции была проверена на модели рулонированного сосуда высокого давления с параметрами: $D = 300$ мм, $\beta = 1,25$, $s_1 = 4$ мм, $s = 1,5$ мм, $n = 23$. Модель была изготовлена на малых вальцах из двойного полотнища, поэтому обеспечить плотное прилегание слоев и натяг $\Delta = 0,17$ мм не удалось. В запас прочности принимаем коэффициент $af = 0,05$. Определяем расчетную величину l :

$$l = \frac{r_0}{af(n-1)} \frac{(\beta^2 - 1)(\beta^2 + \beta_1^2)}{(\beta^2 - \beta_1^2)(\beta + \beta_1)} = \frac{150}{0,05 \cdot 22} \frac{(1,5625 - 1)(1,5625 + 1,054)}{(1,5625 - 1,054)(1,25 + 1,0267)} = 181 \text{ мм.}$$

На рис. 3 показан продольный разрез этой модели после разрушения. Чтобы обеспечить запас по силам трения, фактическая длина l принята 220 мм. Модель выдержала 100 циклов давлением $1,25p_0 = 1,25 \cdot 26,7 = 33,4$ МПа и была разрушена от кольцевых напряжений давлением 71 МПа (рис. 4). При этом фактический запас прочности составил 2,66.

Легко заметить, что фрикционные соединения могут воспринимать не только осевую силу, но и кольцевую силу. То есть при изготовлении многослойного сосуда с концентрическим расположением слоев обечайки, составляющие концентрический слой, можно не сваривать между собой продольными швами. Преимущества такой конструкции очевидны:



– не будут фиксироваться продольными швами зазоры между слоями, и можно обеспечить более плотное прилегание слоев;

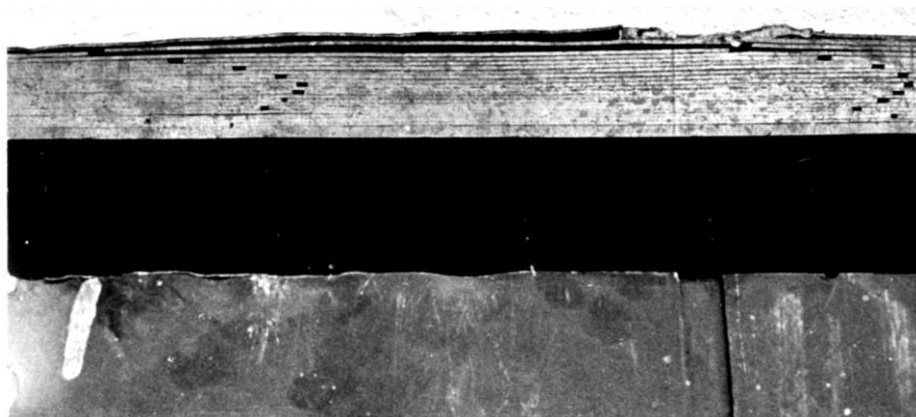


Рис. 3. Продольный разрез модели после разрушения
Fig. Longitudinal section of the model after destruction

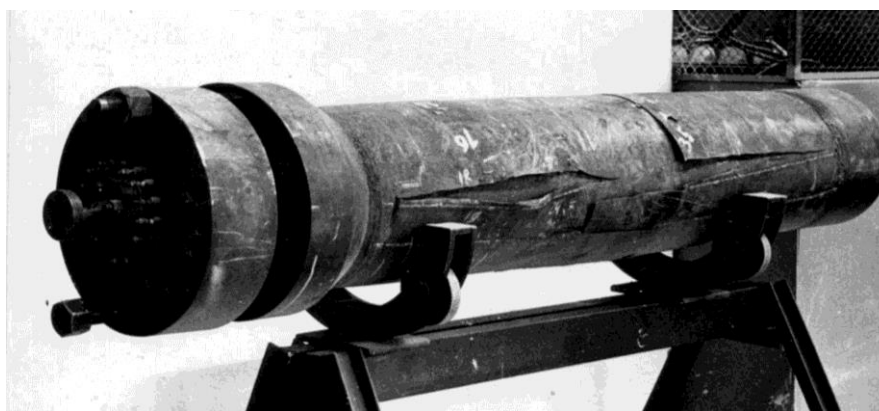


Рис. 4. Модель с ФКС после разрушения
Fig. 4. Model with the friction ring joint after destruction

– сокращаются операции сварки, слесарной обработки и контроля продольных швов и возможна механизация процесса изготовления сосуда.

Условие кольцевой прочности в этом случае имеет вид

$$\sum_{i=1}^{n-1} p_i l a f \geq p_0 r_0, \quad (35)$$

где l – кратчайшее расстояние от продольного стыка нижнего листа до продольного стыка верхнего листа.

Контактные давления в многослойном цилиндре можно приближенно представить в виде

$$p_i = \frac{a p_0}{\beta^2 - 1} \left(\frac{r_n^2}{r_i^2} - 1 \right), \quad (36)$$

где $0 \leq a \leq 1$, a – понижающий коэффициент, зависящий от плотности прилегания слоев.

Тогда условие (35) принимает вид:

$$\frac{a f l}{r_0 (\beta^2 - 1)} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{r_n^2}{r_i^2} - 1 \right) \geq 1 \quad (37)$$

При большом числе тонких слоев сумму можно заменить интегралом:

$$\frac{1}{s} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{r_n^2}{r_i^2} - 1 \right) s \cong \frac{1}{s} \int_{r_1}^{r_{n-1}} \left(\frac{r_n^2}{r^2} - 1 \right) dr = \frac{(r_{n-1} - r_1)}{s} \left(\frac{r_n^2}{r_1 r_{n-1}} - 1 \right) = (n-1) \left(\frac{r_n^2}{r_1 r_{n-1}} - 1 \right) \quad (38)$$

Используя это выражение в условии прочности (37), получим

$$l \geq \frac{r_0 (\beta^2 - 1) \beta_1 \beta_{n-1}}{a f (n-1) (\beta^2 - \beta_1 \beta_{n-1})} \quad (39)$$

Для колонны синтеза аммиака при $\beta = 1,2$, $r_0 = 1200$, $\beta_1 = 1,02$, $\beta_{n-1} = 1,192$, $n = 43$, $a f = 0,1$ достаточно перекрыть слои на величину:

$$l \geq \frac{1200(1,2^2 - 1)1,02 \cdot 1,192}{0,1 \cdot 42(1,2^2 - 1,02 \cdot 1,192)} = 682 \text{ мм.}$$

При средней длине окружности ~ 8000 мм эта задача легко решается.

Заключение

Несущая часть многослойных цилиндрических обечаек для корпусов сосудов высокого давления и энергетических реакторов может быть изготовлена из стальных прокатанных листовых заготовок ленточной формы двойной толщины (см. рис. 1). Эффективность такой конструкции была показана нами в данной работе на примере промышленного образца.

Разработанная математическая модель дает обоснование технологичности конструкции фрикционных кольцевых соединений. Эта модель определяет принцип, который, по нашему мнению, должен быть одним из основных на этапе конструирования сосудов высокого давления и реакторов, несущая часть корпуса которых (обечайка) компонуется из нескольких (двух и более) царг с использованием фрикционных кольцевых соединений и имеет обоснованные нами преимущества перед традиционными [16–21] сварными кольцевыми соединениями.

Библиографический список

1. Barbero E.J., Luciano R., Sacco E. Three-dimensional plate and contact/friction elements for laminated composite joints // Computers & Structures. 1995. Vol. 54. № 4. P. 689–703.
2. Klyukin A.Y. The Experimental Check of Reliability of Mathematical Models of Friction Joints // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2011. № 3. P. 56–63.
3. Zaspas Y.P., Razuvaeva M.A., Shalapko Y.I. Dynamic self-adjustment to external force effect in a nominally stationary friction joint // Journal of Friction and Wear. 2011. Vol. 32. № 4. P. 286–290. DOI: 10.3103/S1068366611040131
4. Khoo H.-H., Clifton G.C., Butterworth J., Mac Rae G.A., Gledhill S., Sidwell G. Development of the self-centering Sliding Hinge Joint with friction ring springs // Journal of Constructional Steel Research. 2012. Vol. 78. P. 201–211. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.07.006
5. Енджиевский Л.В., Тарасов А.В. Влияние толщины соединяемых элементов на несущую способность многоболтового фрикционного соединения // Вестник МГСУ. 2012. № 9. С. 116–123.



6. Клюкин А.Ю. Математические модели фрикционных соединений на основе дифференциальных уравнений // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2012. № 3 (27). С. 9–16.
7. Klyukin A.Y. Mathematical model of a friction joint consisting of two sheets // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2014. № 3 (23). P. 84–99.
8. Клюкин А.Ю. Математическая модель фрикционного соединения с проскальзыванием, состоящего из двух листов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2016. № 1 (41). С. 109–116.
9. Khoo H.-H., Clifton C., Butterworth J., and Mac Rae G. Experimental Study of Full-Scale Self-Centering Sliding Hinge Joint Connections with Friction Ring Springs // Journal of Earthquake Engineering. 2013. Vol. 17. № 7. P. 972–997. DOI: 10.1080/13632469.2013.787378
10. Khoo H.-H., Clifton C., Mac R., and Ramhormozian S. Proposed design models for the asymmetric friction connection // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2015. Vol. 44. № 8. P. 1309–1324. DOI: 10.1002/eqe.2520
11. Rodgers G.W., Herve R., Macrae G.A., Golondrino J.Ch., Chase J.G. Dynamic Friction Coefficient and Performance of Asymmetric Friction Connections // Structures. 2018. Vol. 14. P. 416–423. DOI: 10.1016/j.istruc.2017.09.003
12. Veljkovic M., Feldmann M., Naumes J., Pak D., Rebelo C., Simões da Silva L. Friction connection in tubular towers for a wind turbine // Stahlbau. 2010. Vol. 79, № 9. P. 660–668. DOI: 10.1002/stab.201001365
13. Pavlović M., Heistermann C., Veljkovic M., Pak D., Feldmann M., Rebelo C., Simões da Silva L. Friction connection vs. ring flange connection in steel towers for wind converters // Engineering Structures. 2015. Vol. 98. P. 151–162. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.026
14. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. 2-е изд. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 560 с.
15. Xu S., Wang W., Chang Y. Using FEM to predict residual stresses in girth welding joint of layered cylindrical vessels // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2014. Vol. 119. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.02.002
16. Xu S., Wang C., Zhao Y. Residual Stress in the Welding Joint of Layered Cylindrical Vessels Including the Weld Clad Effect // Journal of Pressure Vessel Technology. 2015. Vol. 137, № 4. P. 041405. DOI: 10.1115/1.4028726
17. Wei R.C., Shugen Xu, Wang C., Chen X.D. Residual Stresses in Girth Welded Joint of Layered-to-Solid Cylindrical Vessels: A Finite Element Model // Procedia Engineering. 2015. Vol. 130. P. 560–570. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.267
18. Aiju Li, Yanyong Zhu, Xiaojing Yao, Zhonghe Chen, Wang W., Yan Liu The explosion reason analysis of urea reactor of Pingyin // Engineering Failure Analysis. 2009. Vol. 16. № 3. P. 972–986. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.08.006
19. Hilson G. Spatial variation of residual stresses in a welded pipe for high temperature applications // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2009. Vol. 86. № 11. P. 748–756.
20. Ogawa N., Iwamoto Y., Muroya I., Ohta T. Studies of residual stress measurement and analysis techniques for a PWR dissimilar weld joint // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012. Vol. 90–91. P. 84–90. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2011.10.009

References

1. Barbero E.J., Luciano R., Sacco E. Three-dimensional plate and contact/friction elements for laminated composite joints. Computers & Structures, 1995, vol. 54, no. 4, pp. 689–703.
2. Klyukin A.Y. The Experimental Check of Reliability of Mathematical Models of Friction Joints. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture, 2011, no. 3, pp. 56–63.
3. Zaspá Y.P., Razuvaeva M.A., Shalapko Y.I. Dynamic self-adjustment to external force effect in a nominally stationary friction joint. Journal of Friction and Wear. 2011, vol. 32, no. 4, pp. 286–290. DOI: 10.3103/S1068336611040131
4. Khoo H.-H., Clifton G.C., Butterworth J., Mac Rae G.A., Gledhill S., Sidwell G. Development of the self-centering Sliding Hinge Joint with friction ring springs. Journal of Constructional Steel Research. 2012, vol. 78, pp. 201–211. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.07.006
5. Endzhievskiy L.V., Tarasov A.V. Influence of thickness of connected elements onto the bearing capacity of the multiple-bolt friction joint. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2012, no. 9, pp. 116–123. (In Russ.).
6. Klyukin A.Y. Mathematical models of friction joints based on differential equations. Nauchnyy vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arhitektura, 2012, no. 3 (27), pp. 9–16. (In Russ.).
7. Klyukin A.Y. Mathematical model of a friction joint consisting of two sheets. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2014, no. 3 (23). pp. 84–99.
8. Klyukin A.Y. Mathematical model of a friction joint consisting of two sheets. Nauchnyy vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arhitektura, 2016, no. 1 (41), pp. 109–116. (In Russ.).
9. Khoo H.-H., Clifton C., Butterworth J., and Mac Rae G. Experimental Study of Full-Scale Self-Centering Sliding Hinge Joint Connections with Friction Ring Springs. Journal of Earthquake Engineering. 2013, vol. 17, no. 7. pp. 972–997. DOI: 10.1080/13632469.2013.787378
10. Khoo H.-H., Clifton C., Mac R., and Ramhormozian S. Proposed design models for the asymmetric friction connection. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2015, vol. 44, no. 8, pp. 1309–1324. DOI: 10.1002/eqe.2520
11. Rodgers G.W., Herve R., Macrae G.A., Golondrino J.Ch., Chase J.G. Dynamic Friction Coefficient and Performance

- of Asymmetric Friction Connections. Structures. 2018, vol. 14, pp. 416–423. DOI: 10.1016/j.istruc.2017.09.003
12. Veljkovic M., Feldmann M., Naumes J., Pak D., Rebelo C., Simões da Silva L. Friction connection in tubular towers for a wind turbine. Stahlbau. 2010, vol. 79, no. 9, pp. 660–668. DOI: 10.1002/stab.201001365
13. Pavlović M., Heistermann C., Veljkovic M., Pak D., Feldmann M., Rebelo C., Simões da Silva L. Friction connection vs. ring flange connection in steel towers for wind converters. Engineering Structures. 2015, vol. 98, pp. 151–162. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.026
14. Timoshenko S.P., Goodier J. *Theory of elasticity* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka Publ., The science. Chief editorial board of physical and mathematical literature, 1979, 560 p. (In Russ.).
15. Xu S., Wang W., Chang Y. Using FEM to predict residual stresses in girth welding joint of layered cylindrical vessels. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2014, vol. 119, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.02.002
16. Xu S., Wang C., Zhao Y. Residual Stress in the Welding Joint of Layered Cylindrical Vessels Including the Weld Clad Effect. Journal of Pressure Vessel Technology. 2015, vol. 137, no. 4, pp. 041405. DOI: 10.1115/1.4028726
17. Wei R.C., Shugen Xu, Wang C., Chen X.D. Residual Stresses in Girth Welded Joint of Layered-to-Solid Cylindrical Vessels: A Finite Element Model. Procedia Engineering. 2015, vol. 130, pp. 560–570. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.267
18. Aiju Li, Yanyong Zhu, Xiaojing Yao, Zhonghe Chen, Wang W., Yan Liu The explosion reason analysis of urea reactor of Pingyin. Engineering Failure Analysis. 2009, vol. 16, no. 3, pp. 972–986. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.08.006
19. Hilson G. Spatial variation of residual stresses in a welded pipe for high temperature applications. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2009, vol. 86, no. 11, pp. 748–756.
20. Ogawa N., Iwamoto Y., Muroya I., Ohta T. Studies of residual stress measurement and analysis techniques for a PWR dissimilar weld joint. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012, vol. 90–91, pp. 84–90. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2011.10.009

Критерии авторства

Пимштейн П.Г., Еловенко Д.А. предложили метод определения достаточной ширины соединения двух многослойных цилиндрических элементов (царг) для обеспечения технологичности и работоспособности соединения, а также получили математическую модель для оценки параметров условия его прочности. Авторы провели исследование, оформили научные результаты и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пимштейн Павел Гдальевич,
профессор, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела оборудования для химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей и других отраслей промышленности, ИркутскНИИхиммаш,
664074, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3, Россия;
e-mail: pimsh1937@mail.ru

Еловенко Денис Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: elovenko03@gmail.com

Authorship criteria

Pimshtein P.G., Elovenko D.A. proposed a method for determining the sufficient width of the joint of two multilayer cylinder elements (shells) to ensure joint efficiency and manufactural ease. They also obtained a mathematical model for evaluating the parameters of its strength condition. The authors have conducted the research, formalized research results and bear the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel G. Pimshtein,
Professor, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Equipment for Chemical, Petrochemical, Oil and Gas Processing and Other Industries of IrkutskNIHimmash, ul. 3, Akademika Kurchatova St., Irkutsk, 664074, Russia;
e-mail: pimsh1937@mail.ru

Denis A. Elovenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering of Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia;
e-mail: elovenko03@gmail.com



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9.06, 62-523.8

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-285-295>

Модернизация металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением

© В.В. Платонов*, И.Г. Майзель**

*Хакасский технический институт, филиал Сибирского федерального университета, г. Абакан, Россия

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

Резюме: Цель – рассмотреть использование модернизации устаревшего металлорежущего оборудования под современные технологические задачи как одного из экономически обоснованных вариантов, альтернативных покупке нового дорогостоящего оборудования. Использование агрегатирования позволяет в процессе модернизации создавать технологическое оборудование под конкретную группу изделий с реализацией оптимального технологического процесса. Одновременное оснащение станка современной системой управления, а также узлами и оборудованием для CAM-технологий и HSM-технологий позволяет получить качественно новое оборудование. В статье показан практический опыт проведения модернизации продольно-фрезерного станка 6М610Ф11-23 для обработки литейной оснастки. Описано проведение глубокой модернизации с полной заменой всех приводов, электроавтоматики и системы управления. Разработана и адаптирована технологическая оснастка, позволяющая получать несколько изделий на одном станке по оптимальной технологии, что гарантирует высокое качество и производительность. Исключение дополнительных переустановок позволило значительно повысить точность обработки. Использование модернизации дает экономически обоснованную альтернативу организации на базе имеющегося оборудования современного высокотехнологичного производства.

Ключевые слова: станки с числовым программным управлением, модернизация металлообрабатывающих станков, высокотехнологичное производство крупногабаритной литейной оснастки, агрегатирование

Информация о статье: Дата поступления 17 января 2019 г.; дата принятия к печати 21 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Платонов В.В., Майзель И.Г. Модернизация металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 285–295. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-285-295.

Modernization of metalworking CNC machine-tools

Vladimir. V. Platonov, Igor G. Maizel

Khakas Technical Institute, Branch of the Siberian Federal University, Abakan, Russian Federation

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of the paper is to consider the use of obsolete metal-cutting equipment upgrading for modern technological tasks as one of the economically viable options alternative to the purchase of new expensive equipment. The use of aggregation when modernizing allows to create technological equipment for a specific group of products while implementing the optimal technological process. Simultaneous tooling of the machine with a modern control system, units and equipment for CAM-technologies and HSM-technologies allows to obtain some qualitatively new equipment. The article demonstrates the practical experience in the modernization of the longitudinal milling machine 6M610F11-23 for casting equipment treatment. A description is given to deep modernization involving complete replacement of all drives, electrical and control systems. A technological tooling allowing one machine-tool to produce several products by the optimal technology has been developed and adapted. This is the guarantee of high quality and performance. The elimination of additional re-installments has significantly improved the machining accuracy. The use of modernization provides an economically viable alternative for organizing a modern high technology production on the basis of available equipment.

Keywords: CNC machine-tools, modernization of metalworking machine-tools, high technology production of large-size casting equipment, aggregation

Information about the article: Received January 17, 2019; accepted for publication March 21, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Platonov V.V., Maizel I.G. Modernization of metalworking CNC machine-tools. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 285–295. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-285-295.

Введение

На сегодняшний день средний возраст оборудования машиностроительных предприятий России составляет более 25 лет. Доля оборудования с таким сроком службы по данным Росстата превышает 40%. Очевидно, что существует острая потребность в модернизации основных фондов, проведение которой затрудняется существующими проблемами отрасли: неуклонным старением и ухудшением качественного состава инженерных и производственных кадров, недостаточным уровнем инновационного развития российского машиностроения, устаревшей образовательной базой и т.д. [1, 2]. В то же время существуют многочисленные примеры реализованных программ технического перевооружения, результатом которого является новое, но неэффективно работающее оборудование, существенно не увеличивающее прибыли.

Таким образом, предприятия нуждаются не просто в модернизации, а в эффективной модернизации, повышающей технологические возможности и рентабельность производства, увеличивающей уровень инновационности продукции и ее потребительских свойств [3, 4].

Модернизация станков с числовым программным управлением (ЧПУ) – экономичная альтернатива приобретению оборудования при внедрении новых технологий. Модернизация означает продление срока эксплуатации станков путем замены наиболее ответственных узлов или модернизации оборудования, которая предусматривает добавление новой технологии или ее свойств к более старым системам.

Преимуществами модернизации являются:

- экономия на капитальных расходах при введении новых технологий,
- оптимизация существующих технологических компонентов,
- адаптация технологии под новую

или модифицированную продукцию,

- улучшение параметров производства,
- высокая вероятность наличия производственных запчастей.

Модернизация станка предоставляет ему вторую жизнь и расширяет период его использования. За время эксплуатации станка в десять и более лет технологии управления и системы приводов претерпевают фундаментальные изменения как с точки зрения затрат на энергию, так и за счет появления новых функций, которые делают более эффективной работу станка. Кроме того, у новых компонентов более доступны запасные части, и это может иметь решающее значение для безопасной эксплуатации станка во многих случаях [5–7].

Следует отметить, что механическое состояние старых станков обычно является все еще хорошим, так что экономичнее произвести модернизацию системы управления и приводов, чем осуществлять покупку новых станков. Даже при нарушении правил эксплуатации и критическом износе направляющих, влияющих на точность, существуют эффективные методы восстановления их точности. При этом в металлообрабатывающем оборудовании с длительным сроком эксплуатации в результате естественного старения практически отсутствуют внутренние напряжения, что позволяет на их основе создавать оборудование со стабильными геометрическими параметрами, обеспечивающими высокую точность.

Новые технологии и возможности обеспечивают гораздо более гибкое производство. В зависимости от объема работ достигается функциональность станка, отвечающая сегодняшнему уровню техники, это же относится к безопасности и контролю при одновременном соблюдении имеющихся правил и норм. Полный механический и электрический ремонт станка создает инвестиции в перспективу. Даже существующие



старые технологические программы могут быть использованы после модернизации. Дополнительным преимуществом модерни-

зации является возможность включения станка в сеть существующей ИТ-инфраструктуры с мониторингом состояния.

Модернизация устаревших станков с числовым программным управлением под современные технологические задачи

Одним из решений перевооружения станочного парка с целью повышения эффективности производства является утилизация старого оборудования и закупка нового автоматизированного и прогрессивного оборудования с ЧПУ под конкретные детали, а также изменение технологических процессов обработки деталей для выпуска на новых станках. Это целый комплекс мероприятий, сопряженный с большим объемом работы.

При модернизации фрезерных станков такой вариант не всегда приемлем ввиду следующих причин:

- старое оборудование является специальным, но уже устарело и над его производительностью надо работать;
- на базе старого оборудования внедрены уникальные технологии, которые вполне экономичны, но такое оборудование уже не выпускается; при этом аналогов из нового оборудования нет или замена не даст экономической эффективности, а над производительностью, точностью и снижением трудоемкости надо поработать;
- отсутствие финансовых средств на закупку новых станков с ЧПУ;
- финансовое положение предприятия не является устойчивым для крупных инвестиций в модернизацию производства.

В таком случае вариантом выхода из такой ситуации может служить модернизация станков [8–10]. В силу разных вышепредставленных причин на сегодняшний день модернизация станков является актуальной темой для многих предприятий.

При модернизации токарных станков можно отметить следующее. Многие старые станки, произведенные еще в советские времена, имеют жесткую, цельнолитую чугунную станину, которая является основой для всех других частей станка и задает высокую жесткость станку. Замена такого

станка на современное оборудование, но со сварной станиной, может и не привести к желаемому результату. В этом случае нецелесообразно менять старое оборудование на новое, не совсем равноценное по характеристикам. Поэтому модернизация станка будет более надежным и экономически выгодным решением.

Одним из самых распространенных видов модернизации станков с ЧПУ является замена его устаревшей электронной составляющей на современную. Это самый доступный и эффективный способ сохранения эффективной работоспособности оборудования. При модернизации электронной составляющей оборудования учитывают нагрузку оборудования, трудозатраты и ассортимент производимых деталей, квалификацию работников, специфику производства.

Экономическая эффективность модернизации станков очень ощутима в плане экономии потребления электроэнергии. Например, если сравнивать системы ЧПУ 1-го и 4-го поколений, то электропотребление может отличаться в 20–40 раз, при этом капиталовложения окупаются в течение примерно двух лет. Утилизация устаревшего оборудования может частично возместить траты на модернизацию.

К основным мероприятиям при модернизации старых станков относятся:

- замена электродвигателей на более современные;
- установка современных преобразователей;
- замена электрооборудования;
- установка системы ЧПУ или замена старой системы ЧПУ на более прогрессивное ЧПУ;
- установка полноценного монитора;
- установка числовой индикации на универсальные станки;

- замена шарико-винтовых передач, подшипников и других важных деталей, и узлов на более точные аналоги;

- изготовление и установка новых узлов для расширения функциональных возможностей станка.

Модернизация станка с ЧПУ марки 6М610Ф11-23

В качестве основного оборудования для реализации выбранной технологии был взят продольно-фрезерный станок 6М610Ф11-23 производства Минского станкостроительного производственного объединения 1988 г. выпуска. Станок был оснащен устаревшей цикловой системой ЧПУ «Размер-2М-1104» с цифровой индикацией. С помощью устройства матричной логики программировалась работа вспомогательных устройств электроавтоматики. На станке было установлено три шкафа электроавтоматики (шкаф управления шпинделем, шкаф управления приводами подач, шкаф электроавтоматики), которые занимали очень много места, а оборудование, которое было скомпоновано в них, частично вышло из строя и устарело.

Основой модернизации явился модульный принцип построения модернизируемого оборудования или агрегатиро-

вание [11–13].

При модернизации самого станка была использована система ЧПУ «НС-110» производства ООО «Балт-Систем», которая одновременно поддерживает до 16 осей с аналоговым или импульсным каналами (рис. 1, 2), в приводе подач были применены сервоприводы с импульсным каналом управления.

В качестве главного привода использован частотный привод с векторным управлением. Для повышения точности обработки на контуре в качестве датчиков обратной связи использованы оптические линейки по всем трем осям. Результатами контрольных испытаний было подтверждено, что гарантированная точность линейного размера при чистовой обработке на круговом контуре 500 мм составляет не более 0,02–0,03 мм. При этом скорость рабочей подачи достигает до 2 м/мин.



Рис. 1. Вид станка после модернизации
Fig. 1. Machine-tool after modernization



Рис. 2. ЧПУ с поддержкой 8 осей
Fig. 2. CNC with 8 axes



Модульный принцип позволяет расширить технологические возможности станка и поднять качество и производительность. Кроме базового агрегата (самого станка, имеющего 3 линейных оси и насадную базовую торцевую головку (рис. 3), было разработано и изготовлено два круговых модуля для вращения в двух взаимно перпендикулярных осях (рис. 4, рис. 5). В конструкции модулей применены прямые силовые кольцевые серводвигатели (номинальный момент 300 Н·м, максимальная скорость 250 об/мин), которые позволяют полностью отказаться от механики (зубчатых

передач), а также усиленных опор в механизмах.

Для повышения качества пространственных отверстий в больших кристаллизаторах был применен дополнительно линейный двигатель «Bosch Rexroth» (рис. 6), а для реализации технологии HSM – высокоскоростной мотор-шпиндель. (рис. 7). Для обработки малых внутренних технологических отверстий в крупных деталях используется модуль угловой ускорительной головки от швейцарского станка «Starrag KF250» (рис. 8).



Рис. 3. Торцевая головка
Fig. 3. End head



Рис. 4. Круговой модуль 1
Fig. 4. Circular module 1



Рис. 5 Круговой модуль 2
Fig. 5 Circular module 2



Рис. 6. Линейный модуль
Fig. 6. Linear module



Рис. 7. Мотор-шпиндель с модулем крепления
Fig. 7. Motor-spindle with a mounting module



Рис. 8. Угловая головка
Fig. 8. Angular head

После модернизации по модульному принципу значительно расширили технологические возможности станка. Сочетание различных компоновок модулей и сквозная CAD/CAM-технология по 3D-моделям позволяют последовательно обрабатывать практически любые сложные детали за одну-две установки без непосредственного участия

станочника. Отсутствует субъективный фактор, качество определяется только технологией и возможностью оборудования. В зависимости от текущего задания на одном станке осуществляются различные варианты современной многоосевой обработки с элементами технологии HSM.

Технология обработки кристаллизаторов и поддонов для получения плоских слитков

Примером выполняемых работ на станке 6М610Ф11-23 после его обновления является внедрение технологии обработки кристаллизаторов и поддонов для получения плоских слитков для заводов Восточного дивизиона ОК РУСАЛ. Данная технология позволяет вести обработку наружного и внутреннего контуров поддонов (рис. 9), а также кристаллизатора (рис. 10) алюминиевых сплавов в сочетании высокопроизводительной и высокоскоростной обработки в 3-осевом режиме, благодаря высокой жесткости станка и современным приводам и системы ЧПУ (рис. 11–13). Оптимально подобранные режимы резания (обороты шпинделя – 1200–1500 об/мин, глубина резания – 4 мм, подача до 6 м/мин) при использовании фрез диаметром 50 мм обеспечивают скорость съема металла до $1,2 \cdot 10^6$ мм³/мин, что является одним из основных факторов,

определяющих эффективность металлообработки. Стоит отметить, что фрезерование алюминиевых сплавов осложняется их способностью налипать на инструмент при нагреве заготовки от процесса резания. Нами была отработана технология кольцевого обдува инструмента воздухом, при котором процесс резания находился в температурном режиме, исключающим налипание стружки, а поверхность обработки всегда была чистой. Использование воздуха для охлаждения инструмента особенно важно при фрезеровании глубоких ванн, когда затруднено применение традиционных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

В станке сохранен заводской шпиндельный конус ISO 60, который при использовании переходника на ISO 50, позволяет применять широкий ряд металлорежущего инструмента.



Внутренняя поверхность кристаллизатора для удержания смазки выполнена в виде рисок, расположенных под углом. Обычно внутреннюю поверхность получали строганием. Нами была разработана технология накатки рисок непосредственно на фрезерном станке. В данном случае наличие высокой жесткости позволило установить накатную головку непосредственно на шпиндельную бабку (рис. 14), при этом высокоточные приводы обеспечивали необходимую геометрию рисок. При этом данный метод формообразования был не только более технологичным, но и накатанная поверхность обладала более высокой прочностью.

Для сверления отверстий в малых кристаллизаторах применялась адаптированная угловая головка от станка «Starrag KF250». Для пятисторонней обработки поддонов и кристаллизатора, а также простран-

ственного сверления точных отверстий в больших кристаллизаторах спроектирована и в настоящее время собирается 3-осевая шпиндельная головка из двух модулей вращения, модуля перемещения и скоростного мотор-шпинделя, которая крепится на гнездо лобовой головки (рис. 15). Для охлаждения слитка кристаллизатор имеет до 800 отверстий подачи воды диаметром 3,5 мм, глубиной от 40 до 60 мм, что является глубоким сверлением. Отверстия выполнены в два ряда в шахматном порядке с межосевым расстоянием 12 мм. Критическими параметрами для правильной работы кристаллизатора является точное позиционирование отверстия в кристаллизаторе и шаг между отверстиями, которые определяют равномерность струй водяного потока. При попытке изготовления данных отверстий вручную по кондуктору был большой процент брака.



Рис. 9. Поддон
Fig. 9. Tray



Рис. 10. Кристаллизатор
Fig. 10. Crystallizing pan



Рис. 11. Черновая обработка ванны
Fig. 11 Bath rough machining



Рис. 12. Чистовая обработка ванны
Fig. 12. Bath finishing treatment



Рис. 13. Сверление отверстий
Fig. 13. Drilling holes



Рис. 14. Накатка внутренней полости
Fig. 14. Knurling of internal cavity

Процесс глубокого сверления, особенно при опасности налипания стружки, характеризуется глубиной врезания, после которого сверло выводится из отверстия для удаления стружки и охлаждения сверла с помощью СОЖ. Опыт показал, что для надежного процесса сверления алюминиевых сплавов глубина врезания не должна превышать 1–1,5 диаметра отверстия. Таким образом, процесс сверления представляет собой возвратно-поступательное перемещение угловой шпиндельной головки до 15–20 раз при сверлении отверстия. При этом необходимо постоянно обеспечивать соосность инструмента и отверстия, что при дискретной обработке пространственных перемещений больших масс может приводить к дефектам, вплоть до поломки сверла. Для исключения этой проблемы, на проектируемой 3-осевой шпиндельной головке

предусмотрен линейный привод Bosch Rexroth для осевого перемещения шпинделя. При данной технологии шпиндель один раз выставляется в пространстве с использованием приводов станка, а сверление осуществляется только с помощью линейного привода. Это уменьшит затраты электроэнергии, поскольку приводы станка не будут задействованы в процессе сверления, и повысит надежность процесса глубокого сверления.

Данная головка значительно расширяет технологические возможности станка, поскольку она позволяет установку на столе с горизонтальным закреплением деталей вращения длиной до 2 м. В этом случае мы получаем оборудование, способное реализовывать токарные, фрезерные, зубо- и шлицеобрабатывающие процессы на одном станке без переустановки.

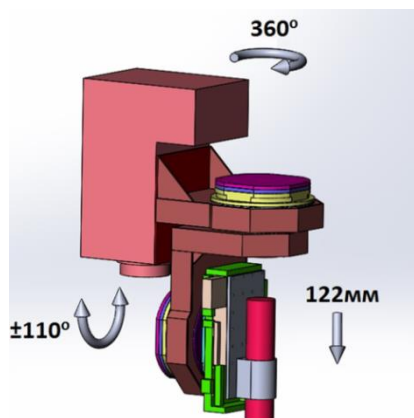


Рис. 15. Специальная трехосевая шпиндельная головка (без мотор-шпинделя)
Fig. 15. Special three-axis spindle head (without a motor spindle)



Разработанная технология и модернизация по модульному принципу позволяют перейти на более высокий уровень организации производства, вести работу в CAD/CAM-системе напрямую с 3D-моделями с сетевой поддержкой на всех уровнях, снизить издержки производства в 5 раз. Технология практически полностью исключает человеческий фактор при производстве изделий и не требует обслуживающего персонала высокой квалификации. Фактически мы получаем два высокотехнологичных

станка на одном рабочем месте – силовой 3-осевой станок (XYZ) и скоростной 6-осевой (XYZACW), со съемными модулями накатки и сверления внутренних отверстий в малых кристаллизаторах.

Станок позволит производить до 7 кристаллизаторов или 10 поддонов больших размеров (800*2200) в месяц при двухсменной работе для заводов Восточного дивизиона ОК РУСАЛ, что практически перекроет годовую потребность.

Заключение

Поведена модернизация под конкретные технологические задачи по модульному принципу, а также получен станок с новыми техническими возможностями:

- во-первых, совместив токарные, фрезерные, зубо- и шлицеобрабатывающие процессы на одном станке, проводя обработку за одну установку, мы не только повышаем общую производительность и качество обработки, но и значительно уменьшаем общие затраты (один станок вместо двух и более);

- во-вторых, учитывая, что используем CAD/CAM-систему напрямую с 3D-моделями и со сквозной сетевой поддержкой, это позволяет исключить субъективный фактор, что также повышает качество обработки;

- в-третьих, используя современные комплектующие, можно получить технические характеристики модернизированного оборудования, значительно превосходящие новое серийно выпускаемое.

В частности, после модернизации

станка 6М610, точность его обработки показала:

- ошибку измерительной системы 0,01 мм на метр длины против 0,1 мм на метр длины в обычном исполнении (паспорт станка 6М610Ф1-23),

- погрешность позиционирования реальная по осям Y и Z не больше 0,01 мм, по оси X не больше 0,03 мм, в то время как новые станки, выпускаемые станкостроительным заводом (г. Минск), имеют точность по ГОСТ 8-82 (Нормальный класс) 0,2–0,3 мм с цифровой индикацией.

Можно сделать вывод, что при правильном подходе, анализе выпускаемой продукции и экономическом обосновании модернизация может быть рациональным решением развития предприятия при выходе на новый технологический уровень.

Описанная выше модернизация станков была выполнена на базе действующего малого предприятия, занимающегося изготовлением крупногабаритной литейной оснастки для алюминиевых заводов.

Библиографический список

1. Волчков И.Л. Исследование фактической работоспособности современного высокопроизводительного оборудования с ЧПУ // Машиностроение и техносфера XXI в.: сборник докладов XVII Междунар. науч.-техн. конф. Донецк. 2011. С. 144–145.
2. Зайцев А., Благодаров А. К вопросу о совершенствовании парка станков с ЧПУ // CADmaster. 2007. № 2. С. 57–58.
3. Емельянов С.А. Модернизация станков с ЧПУ //

- Современные технологии автоматизации. 2001. № 3. С. 34–43.
4. Чудинов А.Н., Часовских Е. Методы модернизации станков с ЧПУ на современном этапе // Ползуновский альманах. 2004. № 3. С. 112–113.
5. Модернизация станков с ЧПУ (на базе ЧПУ Siemens) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www. Technopolus](http://www.Technopolus) (дата обращения: 17.01.2019).

6. Модернизация станков с ЧПУ фрезерной группы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ruchservomotor.ru> (дата обращения: 17.01.2019).

7. Волчкевич И.Л. Рациональное использование станков с ЧПУ в условиях многономенклатурного производства [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Наука и образование». 2012. № 2. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/362086.html> (дата обращения: 17.01.2019).

8. Комаров Ю.Л., Сахно А.С. Техничко-экономическое обоснование модернизации парка металлообрабатывающих станков с ЧПУ // Вестник Казанского технического университета. 2009. № 4. С. 126–130.

9. Соколова И.Д., Бриченков С.Н. Обоснование необходимости модернизации горизонтально-расточного станка с ЧПУ // Международный научный журнал «СИМВОЛ НАУКИ». 2017. Т. 2. № 1. С. 99–101.

10. Тимирязев В.А., Гололобов Д.В., Дудко С.А., Пчельников Р.В. Повышение эффективности многоцелевых станков путем расширения состава применяемого режущего инструмента // Технология машиностроения. 2015. № 8. С. 13–16.

11. Стародубов В.С. Модульный принцип построения металлорежущих станков с числовым программным управлением // Известия высших учебных заведений: Машиностроение. 2013. № 1. С. 68–74.

12. Платонов В.В., Платонова Е.В., Майзель И.Г. Модернизация станков с числовым программным управлением под конкретные технологические задачи с применением элементов агрегатирования // СТН: Научно-технический журнал. 2016. № 8. С. 8–12.

13. Platonov V.V., Platonova E.V., Maizel I.G. Modernization of numerically controlled machine tools on modular principles // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. № 2. P. 140–143.

References

1. Volchkevich I.L. *Issledovanie fakticheskoy rabotosposobnosti sovremennogo vysokoproizvoditel'nogo oborudovaniya s ChPU* [Study of the actual efficiency of modern high-performance CNC equipment]. *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: sbornik dokladov XVII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Mechanical engineering and technosphere of XXI century: collection of reports of XVII interuniversity scientific and technical conference]. Donetsk, 2011, pp. 144–145. (In Russ.).

2. Zajcev A., Blagodarov A. On the problem of improving the fleet of CNC machines. *CADmaster*, 2007, no. 2, pp. 57–58. (In Russ.).

3. Emel'yanov S.A. Modernization of CNC machine-tools. *Sovremennye tekhnologii avtomatizacii* [Contemporary Technologies in Automation], 2001, no. 3, pp. 34–43. (In Russ.).

4. Chudinov A.N., Chasovskih E. Modernization methods for CNC machine-tools at the present stage. *Polzunovskij al'manah*, 2004, no. 3, pp. 112–113. (In Russ.).

5. Modernizaciya stankov s Chislovym programmym upravleniem (na baze ChPU Siemens) [Modernization of CNC machines (based on Siemens CNC)]. URL: <http://www.Technopolus> (accessed: 17 January 2019).

6. Modernizaciya stankov s Chislovym programmym upravleniem frezernoy gruppy [Modernization of CNC milling machines]. URL: <http://www.ruchservomotor.ru> (accessed: 17 January 2019).

7. Volchkevich I.L. Rational use of CNC machines in multi-product manufacturing [Electronic resource]. Online journal “Nauka i obrazovanie” [Science and Educa-

tion]. 2012, no. 2, URL: <http://technomag.edu.ru/doc/362086.html> (accessed: 17 January 2019).

8. Komarov Yu.L., Sahno A.C. Feasibility study of NCN metalworking machine fleet modernization. *Vestnik Kazanskogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 4, pp. 126–130. (In Russ.).

9. Sokolova I.D., Brichenkov S.N. Justification of the modernization need for a horizontal boring CNC machine. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «SIMVOL NAUKI»* [Omega Science. International scientific journal “Symbol of Science”], 2017, vol. 2, no. 1, pp. 99–101. (In Russ.).

10. Timiryazev V.A., Gololobov D.V., Dudko S.A., Pchel'nikov R.V. Increasing of multi-tasking machine efficiency through the use of a structure widening of the employed cutting tools. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2015, no. 8, pp. 13–16. (In Russ.).

11. Starodubov V.S. Modular principle of CNC machine tools. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij: Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2013, no. 1, pp. 68–74. (In Russ.).

12. Platonov V.V., Platonova E.V., Majzel' I.G. Modernization of CNC machines for specific technological tasks with the use of aggregation elements. *STIN: Nauchno-tekhnicheskij zhurnal* [STIN: Scientific and Technical Journal], 2016, no. 8, pp. 8–12. (In Russ.).

13. Platonov V.V., Platonova E.V., Maizel I.G. Modernization of CNC machine-tools on modular principles. *Rossiyskiy inzhenernyy resurs* [Russian Engineering Research], 2017, vol. 37, no. 2, pp. 140–143.



Критерии авторства

Платонов В.В., Майзель И.Г. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Platonov V.V., Maizel I.G. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Платонов Владимир Викторович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры автомобильного транспорта
и машиностроения,
Хакасский технический институт,
филиал Сибирского федерального университета;
655017, г. Абакан, ул. Щетинкина, 27, Россия;
e-mail: pvv_hti@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir V. Platonov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Motor Transport and Mechanical Engineering,
Khakass Technical Institute, branch
of the Siberian Federal University;
27 Shchetinkin St., Abakan 655017, Russia;
e-mail: pvv_hti@mail.ru

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

Igor G. Maizel,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Technology
and Equipment of Mechanical Engineering Industries,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia;
e-mail: baik-@mail.ru



Метод пассивной идентификации математической модели установки распределенной генерации

© Ю.Н. Булатов

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

Резюме: Цель – разработка метода пассивной непараметрической идентификации математической модели установки распределенной генерации на основе экспериментальных данных для определения оптимальных коэффициентов настройки регуляторов генераторов, работающих в различных режимах. Для достижения цели использовались методы цифровой обработки сигналов: вейвлет-преобразование для выделения шума регуляторов, дискретное быстрое преобразование Фурье для получения спектральных характеристик системы и весовые окна для сглаживания эмпирических оценок комплексных передаточных коэффициентов. Для анализа состоятельности экспериментальной модели использовалась функция спектра квадрата когерентности, на основе которой рассчитывалась средняя квадратичная случайная ошибка в определении модуля комплексного передаточного коэффициента. Также использовалось моделирование электроэнергетических систем с регулируемыми установками распределенной генерации в программной среде MATLAB с применением пакетов Simulink, SimPowerSystems и специализированного программного комплекса для расчета оптимальных коэффициентов регуляторов на основе генетического алгоритма. Результаты компьютерного моделирования показывают, что разработанный метод пассивной непараметрической идентификации модели установки распределенной генерации и созданный на его основе программный алгоритм позволяют получить достоверную математическую модель, которая в дальнейшем может использоваться для определения оптимальных коэффициентов настройки регуляторов синхронного генератора и оценки запаса устойчивости. На основе проведенных исследований и компьютерного моделирования может быть сформулирован вывод о том, что представленный алгоритм метода идентификации математической модели замкнутой регулируемой установки распределенной генерации позволяет определять оптимальную настройку регуляторов синхронного генератора, улучшающую демпферные свойства системы, делая управление частотой и напряжением более быстрым и плавным.

Ключевые слова: идентификация математической модели, шум регулятора, установка распределенной генерации, моделирование

Информация о статье: Дата поступления 25 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Булатов Ю.Н. Метод пассивной идентификации математической модели установки распределенной генерации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 296–309. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-296-309.

Passive identification method of distributed generation plant mathematical model

Yuri N. Bulatov

Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation

Abstract: The article deals with the development of the method of passive non-parametric identification of a mathematical model of distributed generation (DG) plant based on experimental data in order to determine the optimal tuning factors for generator controllers operating in various modes. The purpose is achieved through the application of the following methods of digital signal processing: wavelet transform for controller noise identification, discrete fast Fourier transform for obtaining the spectral characteristics of the system and weight windows for smoothing the empirical estimates of complex transfer coefficients. To analyze experimental model consistency, the spectrum function of the squared coherence is used. The average random quadratic error in the determination of the complex transfer coefficient modulus has been calculated on its basis. It is also applied the simulation of electric power systems (EPS) with adjustable DG plants in the MATLAB software environment using Simulink, SimPowerSystems software packages and a specialized software package for calculating optimal controller coefficients based on a genetic algorithm. Computer simulation results show that the developed method of passive non-parametric identification of the DG plant model and the software algorithm created on its basis allow to

obtain a reliable mathematical model, which can be used for determining the optimal tuning factors for synchronous generator controllers and estimation of the stability margin. The conducted research and computer modeling allowed to derive a conclusion that the presented identification algorithm for the mathematical model of the closed-loop adjustable DG plant allows to determine the optimal setting of synchronous generator controllers, which improves the damping properties of the system making the frequency and voltage control faster and smoother.

Keywords: mathematical model identification, controller noise, distributed generation plant, simulation

Information about the article: Received December 25, 2018; accepted for publication March 12, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Bulatov Yu.N. Passive identification method of distributed generation plant mathematical model. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 296–309. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-296-309.

Введение

Концепция интеллектуальных электроэнергетических систем (ЭЭС) [1–7] предполагает активное использование установок распределенной генерации (РГ), находящихся в непосредственной близости от потребителей энергии.

Установки РГ, работающие на основе турбо- и гидрогенераторов, дают возможность получить большую мощность, что позволяет использовать их для снятия пиковых нагрузок, стабилизации напряжения и частоты в системах электроснабжения (СЭС), а также для снижения потерь электроэнергии. Технологии РГ могут также эффективно использоваться в системах электроснабжения железных дорог [8–11]. При этом параллельная работа установок РГ и ЭЭС усложняет задачи управления режимами. Повысить устойчивость параллельной работы генераторов установок РГ и ЭЭС возможно путем применения автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и автоматических регуляторов частоты вращения (АРЧВ). В этом случае значительное

влияние оказывает правильность выбора настроек регуляторов генераторов установок РГ, работающих как параллельно с ЭЭС, так и в изолированном режиме. Для решения задачи поиска оптимальных коэффициентов каналов регулирования АРВ и АРЧВ генераторов требуется их точное математическое описание, в связи с этим необходима разработка современных методов и алгоритмов идентификации математических моделей установок РГ, работающих в различных режимах.

В статье приведено описание метода пассивной идентификации модели установки РГ, работающей на базе синхронного генератора, с применением технологии вейвлет-преобразования для выделения шума регуляторов и получения экспериментальных комплексных передаточных коэффициентов, описывающих динамические процессы установок РГ в различных режимах.

Алгоритм метода пассивной идентификации модели установки РГ

Блок-схема алгоритма метода пассивной идентификации математической модели установки РГ с автоматическими регуляторами представлена на рис. 1.

Идентификация модели установки РГ предполагает получение математического описания системы с учетом автоматических регуляторов в виде характеристического полинома. Для этого необходимо

представить замкнутую регулируемую установку РГ в виде структуры, показанной на рис. 2. В этом случае для идентификации математической модели будет использоваться два входных воздействия, поступающих от регуляторов, и две регулируемые величины: частота вращения ротора ω_g и напряжение генератора U_g (рис. 2).



Removing the experimental values of the "input-output" parameters of the closed-loop adjustable system "turbine-generator" for various operating modes of the DG plant

Снятие экспериментальных значений параметров «вход-выход» замкнутой регулируемой системы «турбина-генератор» для различных режимов работы установки РГ

Extraction of regulator noise using wavelet transform from all observed «input-output» parameters

Выделение шума регуляторов с помощью вейвлет-преобразования со всех наблюдаемых параметров «вход-выход»

Using the Fourier transform to obtain the spectra of the input and output signals of the model

Использование преобразования Фурье для получения спектров входных и выходных сигналов модели

Formation of matrix transfer function on the basis of complex transfer coefficients of the main channels and cross-links of the "turbine-generator" system

Формирование матричной передаточной функции на основе комплексных передаточных коэффициентов основных каналов и перекрестных связей системы «турбина-генератор»

Smoothing the empirical estimates of the complex transfer coefficients of the turbine-generator system model

Сглаживание эмпирических оценок комплексных передаточных коэффициентов модели системы «турбина-генератор»

Assessment of the adequacy of the experimental model of the DG plant

Оценка адекватности полученной экспериментальной модели установки РГ

Is the model satisfactory?



Compilation of the characteristic polynomial of the closed regulated "turbine-generator" system of the DG plant

Составление характеристического полинома замкнутой регулируемой системы «турбина-генератор» установки РГ

Рис. 1. Блок-схема алгоритма идентификации модели установки распределенной генерации
Fig. 1. Block diagram of the identification algorithm of the distributed generation plant model

В предлагаемой структуре модели установки РГ в качестве АРЧВ может использоваться пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, а в качестве АРВ – микропроцессорный АРВ сильного действия, также реализующий ПИД закон. Эти регуляторы могут быть представлены следующими комплексными передаточными коэффициентами:

$$W_{ARRS} = \left(k_p + \frac{k_i}{0,1j\omega} + \frac{k_d j\omega}{j\omega + 1} \right) \cdot \frac{1}{0,01j\omega + 1}, (1)$$

где W_{ARRS} – комплексный передаточный коэффициент АРЧВ; k_p, k_i, k_d – коэффициенты настройки АРЧВ; $j\omega$ – комплекс частоты;

$$W_{AER}^{\omega} = \frac{1 + 0,5j\omega}{0,5j\omega} \times \left[\frac{2k_{0\omega}j\omega}{(2j\omega + 1)(0,02j\omega + 1)} + \frac{0,05k_{1\omega}j\omega}{0,05j\omega + 1} \right]; (2)$$

$$W_{AER}^U = \frac{1 + 0,5j\omega}{0,5j\omega} \cdot \left(k_{0u} - \frac{0,02k_{1u}j\omega}{0,06j\omega + 1} \right); (3)$$

где W_{AER}^{ω} – комплексный передаточный коэффициент канала АРВ по частоте; W_{AER}^U – то же для канала АРВ по напряжению; k_{0u} , k_{1u} , $k_{0\omega}$ и $k_{1\omega}$ – коэффициенты настройки АРВ. Для получения комплексных передаточных коэффициентов генератора установки РГ предлагается использовать в качестве тестового воздействия выделенный с помощью вейвлет-преобразования шум регуляторов [12]. Блок-схема предлагаемого алгоритма выделения шума регуляторов с помощью вейвлет-преобразования представлена на рис. 3.

Выделение шума регулятора, используемого для идентификации, выполняется по выражению: $f_v(t) = f(t) - f_w(t)$, где $f(t)$ – исходный сигнал, содержащий шум; $f_w(t)$ – полезная составляющая сигнала, получаемая в результате вейвлет-преобразования; $f_v(t)$ – шум.

Эффективность применения алгоритма выделения шума регулятора, используемого при идентификации, продемонстрирована на рис. 4. Неровности контурных линий скейлинграммы (рис. 4 б) указывают на наличие шума.

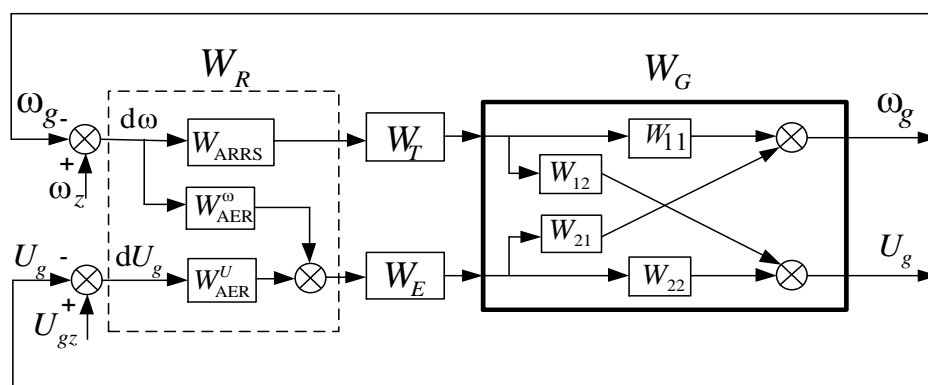


Рис. 2. Структурная схема регулируемой установки распределенной генерации:

W_G , W_T , W_E , W_R – передаточные функции генератора, турбины, возбудителя и регулятора

Fig. 2. Structural diagram of the adjustable distributed generation plant:

W_G , W_T , W_E , W_R – transfer functions of the generator, turbine, exciter and controller

The formation of the wavelet decomposition of the original time signal to the level of N

1 Формирование вейвлет-разложения исходного временного сигнала до уровня N

Setting the threshold of the useful signal for each level N and the implementation of the processing of detail coefficients

2 Задание порога полезного сигнала для каждого уровня N и осуществление обработки детализирующих коэффициентов

Wavelet reconstruction of the signal using the initial N-level approximation coefficients and modified detail coefficients

3 Вейвлет-реконструкция сигнала, использующая первоначальные аппроксимирующие коэффициенты уровня N и модифицированные детализирующие коэффициенты

Regulator noise extraction, which is used to identify

4 Выделение шума регулятора, который используется для идентификации

Рис. 3. Блок-схема алгоритма выделения шума регуляторов
 Fig. 3. Block diagram of the algorithm of controller noise identification

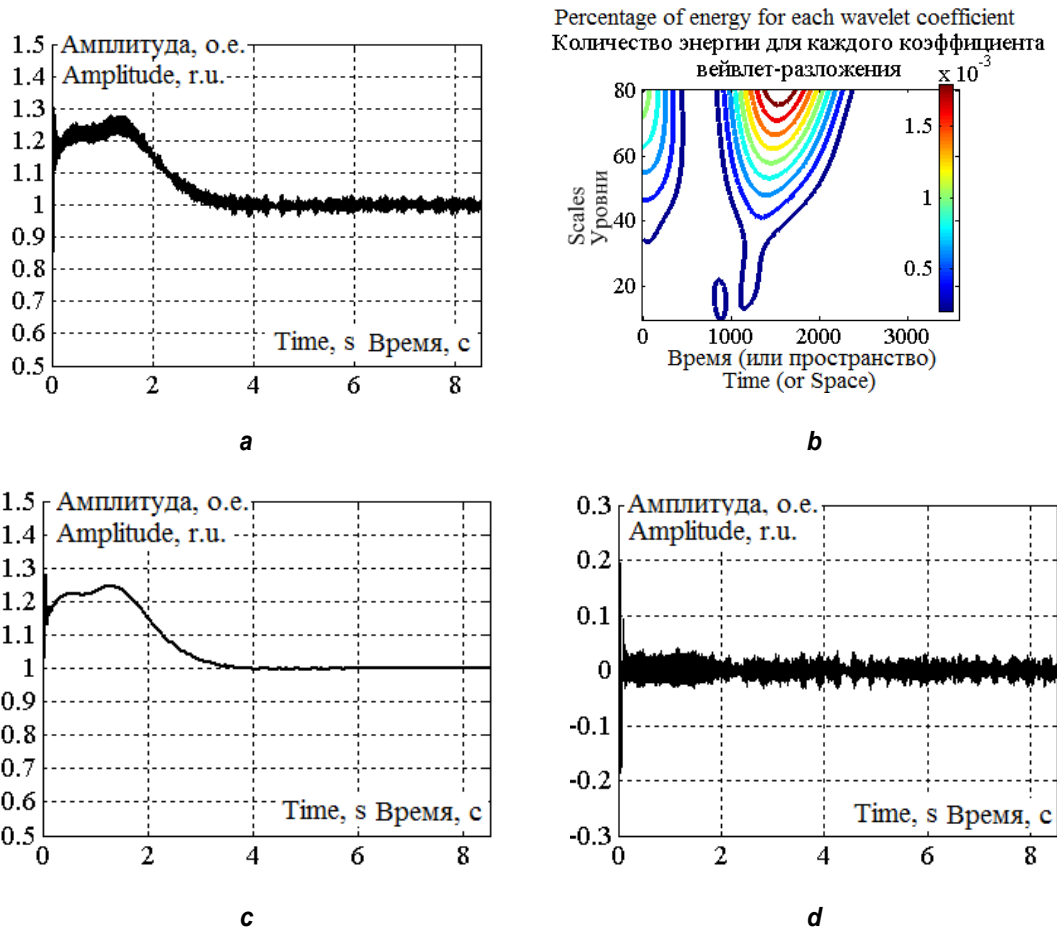


Рис. 4. Результаты применения алгоритма выделения шума регулятора:
a – исходный зашумленный сигнал регулятора; b – скейлингграмма сигнала регулятора;
c – выделенный полезный сигнал; d – шум
Fig. 4. Application results of the controller noise identification algorithm: a – original noisy signal of the controller; b – scaling gram of the controller signal; c – selected desired signal; d – noise

Передаточные функции АРВ, АРЧВ, турбины и возбудителя, как правило, известны. В этом случае основная задача идентификации модели установки РГ состоит в определении матричной передаточной функции генератора $W_T = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}$.

Если обозначить через U_1, U_2 – спектры шумов входных сигналов, а Y_1, Y_2 – спектры шумов выходных сигналов, то отношение спектральных характеристик шумов выходных и входных сигналов определит необходимые комплексные передаточные коэффициенты. Для отдельной установки РГ необходимо определить спектры шумов входных и выходных сигналов для двух различных нагрузочных режимов, и получить две си-

стемы уравнений, из которых и определяются комплексные передаточные коэффициенты основных каналов W_{11}, W_{22} и перекрестных связей W_{12}, W_{21} :

$$\begin{cases} Y_1 = W_{11} \cdot U_1 + W_{12} \cdot U_2, \\ Y_2 = W_{21} \cdot U_1 + W_{22} \cdot U_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y'_1 = W_{11} \cdot U'_1 + W_{12} \cdot U'_2, \\ Y'_2 = W_{21} \cdot U'_1 + W_{22} \cdot U'_2 \end{cases}$$

Спектры шумов входных и выходных сигналов определяются с помощью аппарата дискретного преобразования Фурье.

Если построить частотные характеристики по полученным с помощью шумов регуляторов комплексным передаточным

коэффициентам, то они оказываются недостаточно «гладкими». В связи с этим необходимо проводить дополнительную обработку полученных при идентификации комплексных передаточных коэффициентов. Для этого предлагается использовать цифровую обработку сигналов на основе весовых окон [13], что предполагает использование (вместо полученной при идентификации экспериментального комплексного передаточного коэффициента) оценки, основанной на последовательном усреднении каждого спектра дискретной выборки исследуемых сигналов системы [13]:

$$W'(j\omega) = \frac{\sum_{i=1}^Q W_{\gamma}(\omega) \cdot |U(i\Delta\omega)|^2 \cdot W(i\Delta\omega)}{\sum_{i=1}^Q W_{\gamma}(\omega) \cdot |U(i\Delta\omega)|^2}, \quad (4)$$

где $W(i\Delta\omega) = \frac{Y(i\Delta\omega)}{U(i\Delta\omega)}$ – экспериментальный комплексный передаточный коэффициент, полученный при идентификации с помощью шума регуляторов; $U(i\Delta\omega)$ – спектр шума входного сигнала; $Y(i\Delta\omega)$ – спектр шума выходного сигнала; $W_{\gamma}(\omega)$ – весовая функция или весовое окно.

Алгоритм сглаживания комплексного передаточного коэффициента был реализован в виде программы, позволяющей получать достоверную математическую модель объекта регулирования и строить частотные характеристики.

Для выбора диапазона изменения частоты при идентификации математической модели установки РГ предлагается использовать метод, основанный на волновом подходе [14], позволяющий определять полосу пропускания системы, как суммарную частоту собственных колебаний агрегатов установок РГ:

$$\Omega_i = 2\omega_{pi} \cdot \sin(\varphi_i / 2) \times \sqrt{\frac{K_i}{1 + 4K_i \cdot \sin^2(\varphi_i / 2)}}, \quad (5)$$

где $\omega_{pi} = \frac{\sqrt{\frac{\partial P_{\Gamma i}}{\partial \delta_{\Gamma i}} \cdot \frac{\omega_0}{T_{j\text{эк}}}}}{2\pi}$ – парциальная ча-

стота (частота собственных колебаний ротора i -го генератора установки РГ), Гц; $\frac{\partial P_{\Gamma i}}{\partial \delta_{\Gamma i}} = \frac{E_{qi} \cdot U_{\Gamma i}}{X_{d\Sigma i}} \cdot \cos \delta_i$ – синхронизирующая мощность i -го генератора установки РГ, о.е.; $\omega_0 = 314$ рад/с – номинальная угловая частота вращения ротора генератора; $T_{j\text{эк}}$ – эквивалентная постоянная механической инерции агрегата, с; φ_i – волновое число (изменение фазы пространственной гармоники между двумя смежными узлами цепочечной схемы), рад. Для цепочечной однородной схемы, состоящей из N генераторов, при наличии связи с системой, волновое число определяется так [14]:

$$\varphi_i = \frac{(i - 0,5) \cdot \pi}{N + 0,5}; \quad K_i = \frac{U_s \cdot X_{di}}{E_{qi} \cdot X_{d\Sigma i}} - \text{коэффициент}$$

относительной жесткости связей i -го генератора с системой, о.е.; X_{di} – индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, о.е.; $X_{d\Sigma i} = X_{di} + X_{BH}$ – общее сопротивление связи генератора и внешней сети; U_s – напряжение на шинах системы.

Шаг дискретизации по времени исходных выборок входных и выходных сигналов установки РГ, в соответствии с теоремой Котельникова, зависит от максимальной частоты полосы пропускания системы: $\Delta t = 1 / 2 \cdot \Omega_{\max}$. Длина фиксированной выборки входных и выходных сигналов системы определяется количеством точек, фиксирующих точность построения оценки: $T = n \cdot \Delta t$. На основе проведенных экспериментальных исследований [15] выявлено, что наиболее приемлемыми для исследования электромеханических колебаний в ЭЭС являются значения $n = 256$ или 512 и $\Delta t = 0,05 \dots 0,1$ с.

Для анализа состоятельности экспериментальной модели в виде комплексных передаточных коэффициентов предлагается использовать функцию спектра квадрата когерентности [16]:



$$\gamma_{YU}^2(\omega) = \frac{|S_{YU}(j\omega)|^2}{S_Y(\omega)S_U(\omega)}, \quad (6)$$

где $S_U(\omega)$, $S_Y(\omega)$ – функции плотности спектров мощности входных и выходных шумов наблюдаемых сигналов системы; $S_{YU}(j\omega)$ – функция плотности кросс-спектра, принимающая действительные значения в интервале $0 \leq \gamma_{YU}^2(\omega) \leq 1$.

Плотности спектров мощности шумов наблюдаемых сигналов исследуемой системы могут быть найдены с помощью цифровых осредненных комплексных спектров входного и выходного сигналов:

$$\begin{aligned} S_U(\omega) &= \frac{1}{n \cdot \Delta t} \cdot |U(j\omega)|^2, \\ S_Y(\omega) &= \frac{1}{n \cdot \Delta t} \cdot |Y(j\omega)|^2, \\ S_{YU}(j\omega) &= \frac{1}{n \cdot \Delta t} \cdot Y(j\omega) \cdot U(j\omega). \end{aligned} \quad (7)$$

Для идеальной линейной связи «вход-выход» во всем диапазоне частот выполняется равенство $\gamma_{YU}^2(\omega) = 1$, т.е. функция спектра квадрата когерентности (6) достигает своего максимального значения на тех частотах, где связь входного и выходного сигнала будет линейной.

Используя $\gamma_{YU}^2(\omega)$, можно рассчитать среднюю квадратичную случайную ошибку в определении модуля комплексного передаточного коэффициента [15, 16]:

$$\varepsilon[W(j\omega)] = \frac{\sqrt{1 - \gamma_{YU}^2(\omega)}}{|\gamma_{YU}^2(\omega)| \cdot \varepsilon_0}, \quad (8)$$

где ε_0 – статистическая ошибка при определении частотных спектров, $\varepsilon_0 = \sqrt{1/n}$; n – количество точек в частотном диапазоне.

Из выражения (8) видно, что в случае проведения «идеального» эксперимента при идентификации модели установки РГ

значения $\gamma_{YU}^2(\omega)$ близки к единице и вычислительная ошибка идентификации стремится к нулю.

Необходимо отметить, что точность идентифицируемой математической модели системы «турбина-генератор» может быть достигнута путем получения комплексных передаточных коэффициентов основных каналов и перекрестных связей для всех возможных режимов работы установки РГ.

В случае удовлетворительной оценки модели завершением процедуры идентификации будет составление характеристического полинома замкнутой регулируемой установки РГ для конкретного режима работы по следующему выражению:

$$D^*(j\omega) = \det[E + W_{об} \cdot W_p], \quad (9)$$

где E – единичная матрица; $W_{об}$ – матричная передаточная функция объекта регулирования, включающая в себя комплексные передаточные коэффициенты основных каналов и перекрестных связей генератора, а также комплексные передаточные коэффициенты турбины и возбудителя; W_p – матричная передаточная функция регулятора, учитывающая взаимосвязь АРВ и

$$\text{АРЧВ: } W_p = \begin{bmatrix} W_{APЧВ}(j\omega) & W_{APB}^\omega(j\omega) \\ 0 & W_{APB}^U(j\omega) \end{bmatrix}.$$

Характеристический полином, полученный при идентификации замкнутой регулируемой установки РГ, позволяет определять оптимальные коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ генератора с учетом взаимного влияния регуляторов на электро-механические и электромагнитные переходные процессы [15, 17–19]. Представленный алгоритм идентификации математической модели установки РГ был реализован в специализированном программном комплексе [20], позволяющем решать задачу оптимизации настроек АРВ и АРЧВ генератора.

Результаты компьютерного моделирования

Исследования проводились на компьютерной модели системы электроснабжения (СЭС) с установкой РГ (турбогенераторная установка – ТГУ) мощностью 3125 кВ·А, структурная схема которой представлена на рис. 5. Исследуемая модель состоит из ЭЭС 110 кВ, связанной через трансформатор с СЭС 10 кВ с асинхронными высоковольтными и низковольтными электродвигателями и статической активно-индуктивной нагрузкой S_1 , S_2 .

Для идентификации модели ТГУ использовались шумы регуляторов, которые принудительно вводились в модель. В канал регулирования АРЧВ вводился белый шум с нормальным распределением и высотой спектральной плотности мощности 0,00002 о.е., а в канал регулирования АРВ – с высотой спектральной плотности мощности 0,002 о.е. Сигналы напряжения, частоты вращения ротора генератора, механической мощности на валу турбины, используемые при идентификации модели ТГУ в установившемся режиме параллельной работы с ЭЭС, представлены на рис. 6.

В результате идентификации модели ТГУ были получены комплексные передаточные коэффициенты основных каналов и перекрестных связей объекта регулирования, амплитудно-частотные характеристики которых показаны на рис. 7.

В результате работы программного комплекса ARE&ARRF [20] и оптимизации с помощью генетического алгоритма настроек

АРВ и АРЧВ генератора с использованием полученной модели ТГУ были определены коэффициенты усиления регуляторов. Окно с результатами работы программного комплекса ARE&ARRF представлено на рис. 8. Оценка запаса устойчивости [15] указывает на достаточную степень устойчивости для найденных коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ.

Для оценки эффективности работы ТГУ при найденной настройке АРВ и АРЧВ с помощью идентифицированной математической модели рассматривался режим работы ТГУ при отключении промышленной сети от источника питания. Результаты моделирования в виде сравнений механической мощности на валу турбины, напряжений и частоты вращения ротора генератора ТГУ при согласованной и несогласованной настройках АРВ и АРЧВ представлены на рис. 9–11. Сравнение результатов моделирования работы ТГУ при отключении питания промышленной сети на стороне 110 кВ показывает, что согласованная настройка регуляторов, полученная на основе идентифицируемой математической модели установки РГ, позволяет снизить перерегулирование механической мощности на валу турбины и напряжения генератора. Также уменьшается время переходного процесса для напряжения. При согласованной настройке АРВ и АРЧВ наблюдается менее колебательный характер переходной характеристики частоты вращения ротора генератора (рис. 10).

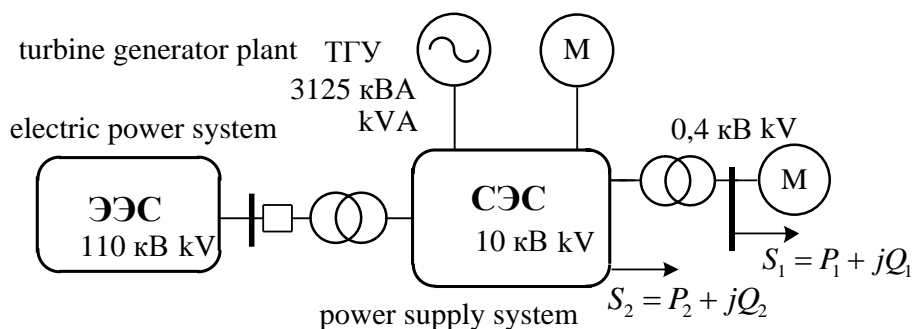


Рис. 5. Структурная схема исследуемой системы электроснабжения
 Fig. 5. Structural diagram of the power supply system under investigation

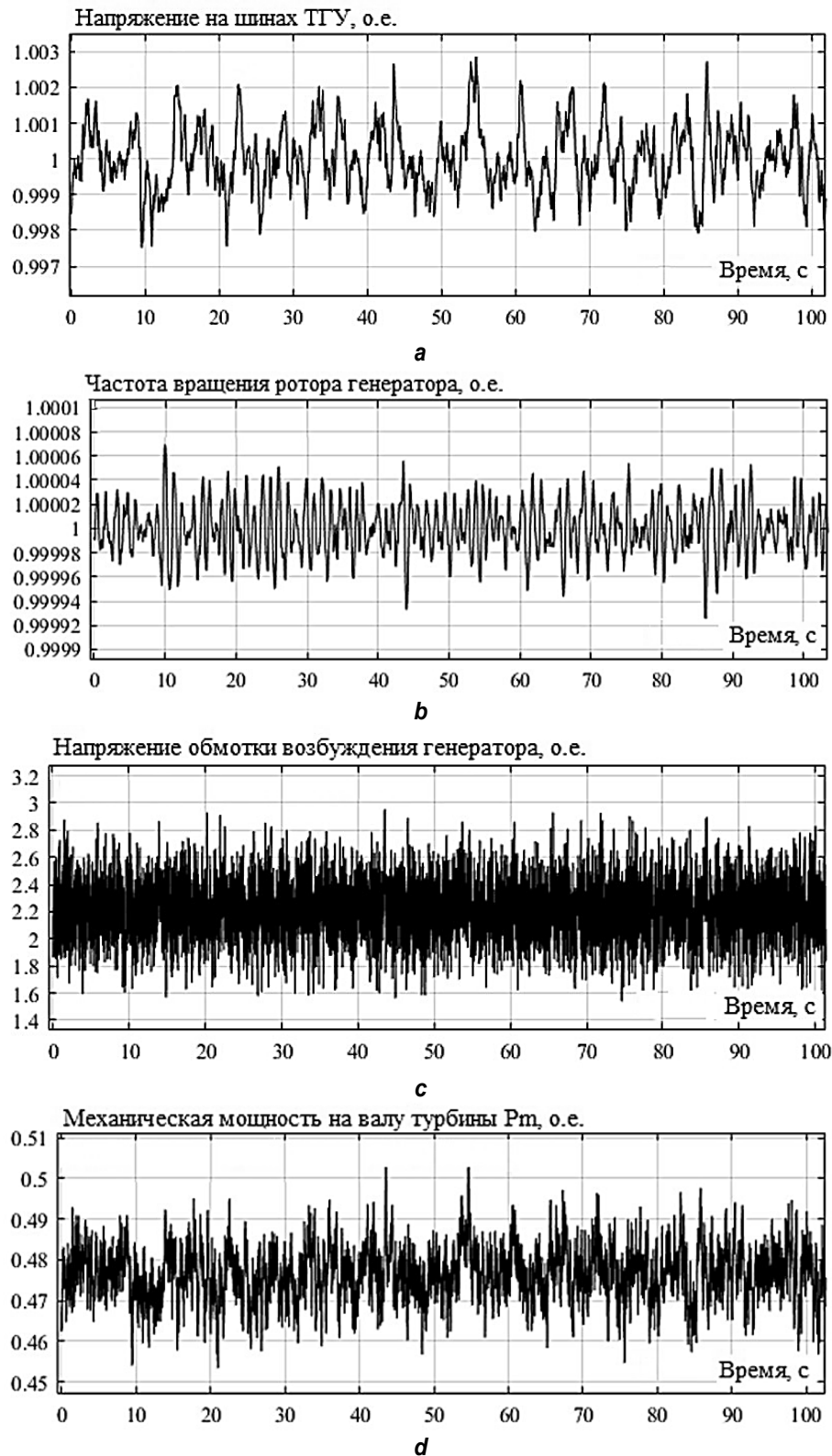


Рис. 6. Параметры ТГУ, используемые для идентификации: а – сигнал изменения напряжения на шинах ТГУ; б – сигнал изменения частоты вращения ротора генератора ТГУ; с – сигнал изменения напряжения на обмотке возбуждения генератора ТГУ; д – сигнал изменения механической мощности на валу турбины ТГУ

Fig. 6. Turbogenerator plant parameters used for identification: а – signal of voltage variation on turbogenerator buses; б – signal of turbogenerator rotation speed variation; с – signal of voltage variation in the turbogenerator excitation winding; д – signal of mechanical power variation on the turbogenerator turbine shaft

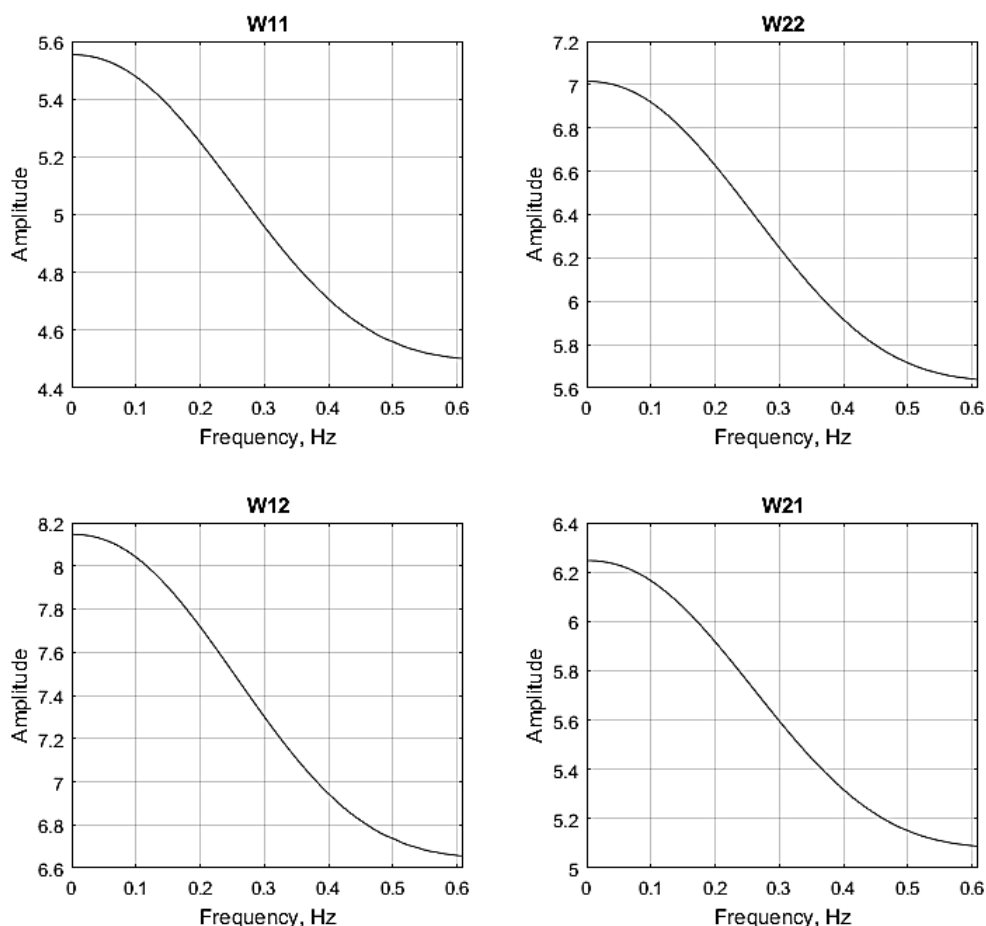


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики основных и перекрестных связей турбогенератора
 Fig. 7. Amplitude-frequency characteristics of the main and cross links of the turbogenerator

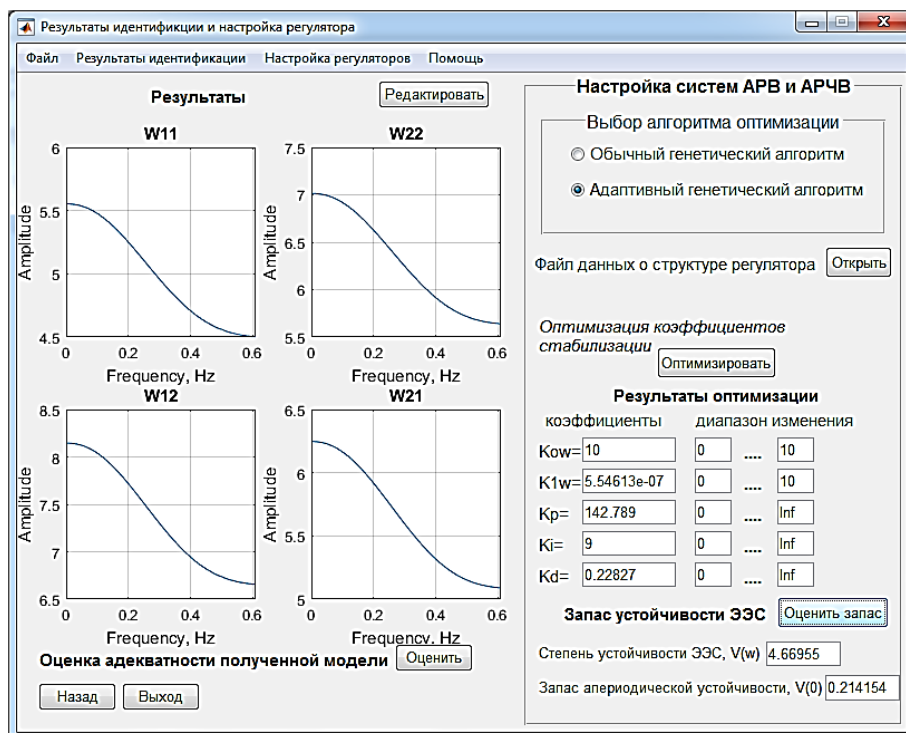


Рис. 8. Окно программного комплекса с результатами идентификации и настройки регуляторов
 Fig. 8. Software window with the results of controller identification and adjustment



Рис. 9. Изменение механической мощности на валу турбины ТГУ при отключении источника питания: 1 – несогласованная настройка АРВ и АРЧВ (перерегулирование $\sigma = 4,88\%$, время переходного процесса $t_p = 3$ с); 2 – согласованная настройка АРВ и АРЧВ ($\sigma = 2,44\%$, $t_p = 3$ с)

Fig. 9. Mechanical power variation on the turbogenerator turbine shaft when the power source is disconnected: 1 – unmatched setting of automatic excitation controllers (AEC) and automatic rotation speed controller (ARSC) (readjustment $\sigma = 4.88\%$, transition process time $t_p = 3$ s); 2 – coordinated adjustment of AEC and ARSC ($\sigma = 2.44\%$, $t_p = 3$ s)

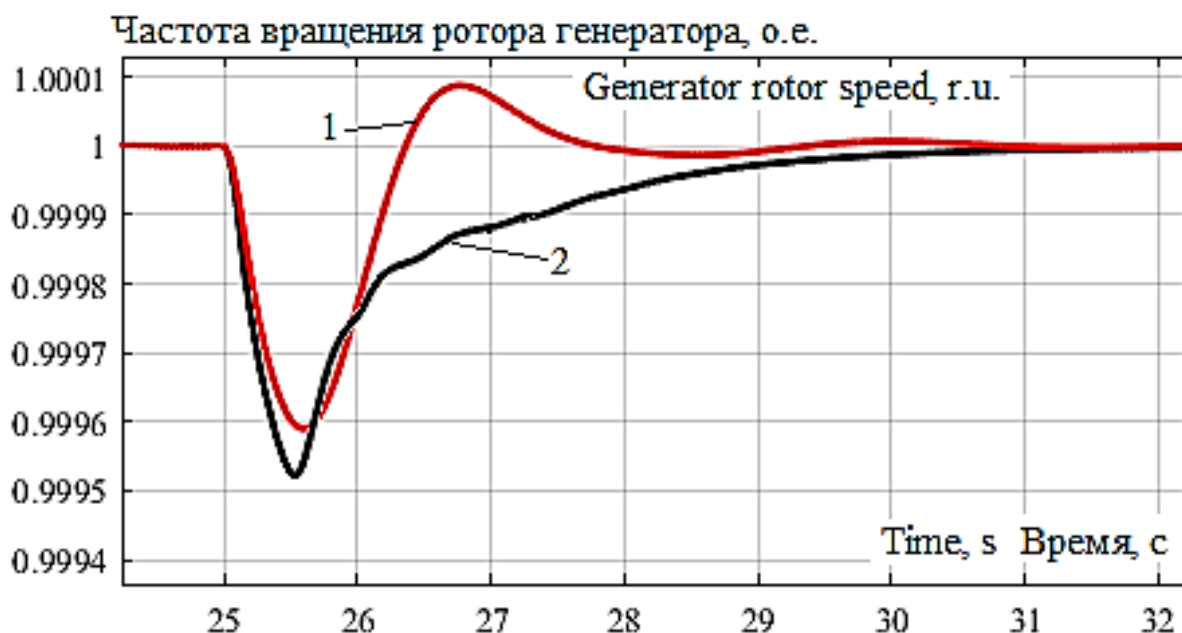


Рис. 10. Изменение частоты вращения ротора генератора ТГУ при отключении источника питания: 1 – несогласованная настройка АРВ и АРЧВ ($\sigma = 0,04\%$, $t_p = 4$ с); 2 – согласованная настройка АРВ и АРЧВ ($\sigma = 0,05\%$, $t_p = 4$ с)

Fig. 10. Variations of the turbogenerator rotation speed when the power source is disconnected: 1 – unmatched setting of AEC and ARSC ($\sigma = 0.04\%$, $t_p = 4$ s); 2 – coordinated adjustment of AEC and ARSC ($\sigma = 0.05\%$, $t_p = 4$ s)

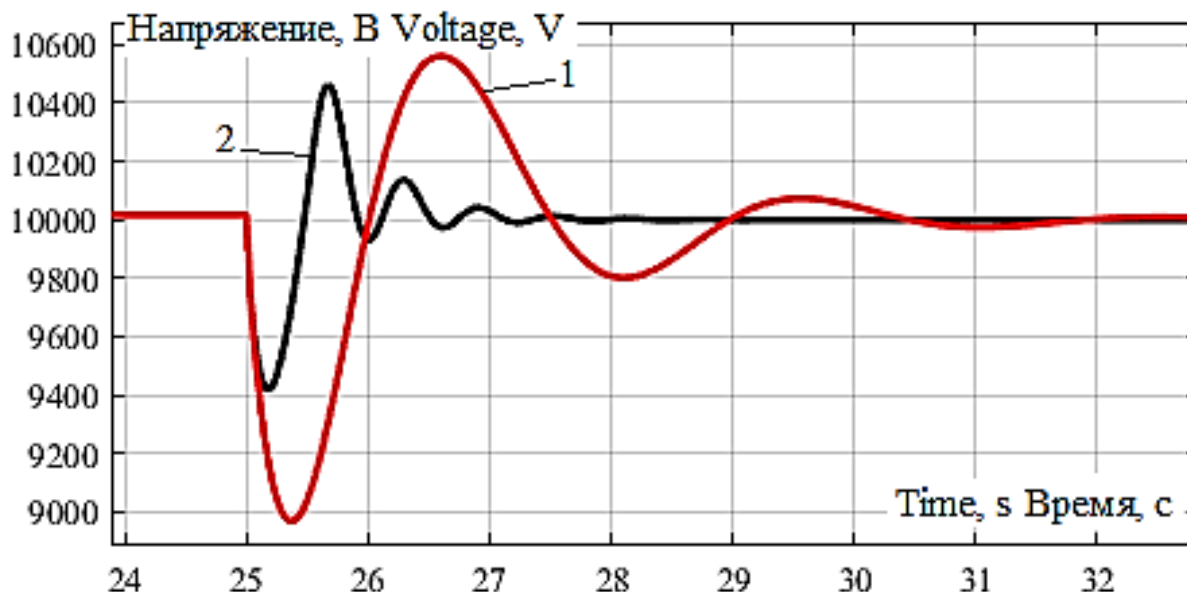


Рис. 11. Изменение напряжения турбогенератора при отключении источника питания:

1 – несогласованная настройка АРВ и АРЧВ ($\sigma = 10\%$, $t_p = 5$ с);

2 – согласованная настройка АРВ и АРЧВ ($\sigma = 6\%$, $t_p = 2$ с)

Fig. 11. Turbogenerator voltage variation when power supply is disconnected: 1 – unmatched setting of AEC and ARSC ($\sigma = 10\%$, $t_p = 5$ s); 2 – coordinated adjustment of AEC and ARSC ($\sigma = 6\%$, $t_p = 2$ s)

Заключение

Представлен алгоритм метода пассивной непараметрической идентификации математической модели замкнутой регулируемой установки РГ, позволяющей определять оптимальную настройку АРВ и АРЧВ синхронного генератора и проводить оценку запаса статической устойчивости.

На основе компьютерного моделирования могут быть сформулированы следующие выводы:

1. Разработанный метод пассивной непараметрической идентификации модели установки РГ и созданный на его основе

программный алгоритм позволяют получить достоверную математическую модель, которая в дальнейшем может использоваться для определения оптимальных коэффициентов каналов регулирования АРВ и АРЧВ синхронного генератора.

2. Использование согласованной настройки регуляторов турбогенераторной установки, полученной с помощью идентифицированной математической модели, улучшает демпферные свойства системы, делая управление частотой и напряжением более быстрым и плавным.

Библиографический список

1. Morzhin Y.I., Shakaryan Y.G., Kucherov Y.N., Voropai N.I., Vasiliev S.N., Yadykin I.B. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia / CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5–7 2011. Manchester, GB: IEEE. The University of Manchester, Panel session 5D, 2011. P. 1–5.
2. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. Vol. 3. No. 2. P. 16–23.
3. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference

- (PEOCO), 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
4. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
5. Фортон В.Е., Макаров А.А. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012. 235 с.
6. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Alekseenko V.A. Modeling of smart grid active elements based on phase coordinates // Smart grid for efficient energy power system for the future. Proceeding. Vol. 1. Otto-von-Guericke University Magdeburg. Magdeburg. 2012. P. 18–22.



7. Фотин В.П., Аракелян В.Г. Технологическая стратегия электроэнергетической системы России // Электричество. 2001. № 9. С. 12–20.
8. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2015. 218 с.
9. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.
10. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Применение технологий распределенной генерации для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Вестник ИрГТУ. 2009. № 1(37). С. 190–195.
11. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 160 с.
12. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 2 (63). С. 7–22.
13. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / пер. с англ. М.: Наука. Гл. ред физ.-мат. лит., 1991. 432 с.
14. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
15. Игнатьев И.В., Булатов Ю.Н. Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов, на основе экспериментальных данных. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 278 с.
16. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 200 с.
17. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Согласованная настройка регуляторов установок распределенной генерации, работающих в системе электроснабжения железной дороги // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1(25). С. 94–102.
18. 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). IEEE Conference Publications. 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911456.
19. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation // Far East Journal of Electronics and Communications. 2017. Vol. 17. No. 5. P. 1127–1140.
20. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Программный комплекс для идентификации электроэнергетических систем и оптимизации коэффициентов стабилизации автоматических регуляторов возбуждения // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 4(8). С. 106–113.

References

1. Morzhin Y.I., Shakaryan Y.G., Kuchero V.Y.N., Voropai N.I., Vasiliev S.N., Yadykin I.B. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia / CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5–7 2011. Manchester, GB: IEEE. The University of Manchester, Panel session 5D, 2011, pp. 1–5.
2. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 16–23.
3. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
4. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, 396 p.
5. Fortov V.E., Makarov A.A. Konceptiya intellektual'noj elektroenergeticheskoy sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoj set'yu [The concept of Russian intelligent power system with an active adaptive network]. M.: OAO «NTC FSK EES», 2012, 235 p.
6. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Alekseenko V.A. Modeling of smart grid active elements based on phase coordinates. Smart grid for efficient energy power system for the future. Proceeding. Otto-von-Guericke University Magdeburg. Magdeburg, 2012, vol. 1, pp. 18–22.
7. Fotin V.P., Arakelyan V.G. Technological strategy of Russian electric power system. *Elektrichestvo* [Electricity], 2001, no. 9, pp. 12–20. (In Russ.).
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. *Intellektual'nye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii* [Intelligent technologies of electric power quality management]. Irkutsk: Irkutsk National Research University Publ., 2015, 218 p. (In Russ.).
9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyuj Hyng. *Setevye klasteri v sistemah elektrosnabzheniya zheleznih dorog* [Network clusters in railway power supply systems]. Irkutsk: Irkutsk state Transport University, 2015, 205 p. (In Russ.).
10. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsent'ev M.O. The application of technologies of distributed generation for power supply of non-traction consumers of railroads. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2009, no. 1(37), pp. 190–195. (In Russ.).
11. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V., Chan Zyuj Hyng. *Raspredelennaya generaciya v sistemah elektrosnabzheniya zheleznih dorog* [Distributed generation in railroad power supply systems]. Irkutsk: Irkutsk state Transport University, 2013, 160 p. (In Russ.).
12. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Application of the wavelet transform and genetic algorithms for tuning automatic regulators of distributed generators. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University], 2016, no. 2 (63), pp. 7–22. (In Russ.).

13. L'Yung L. System Identification. Theory for the user, 1991, 432 p. (Russ. ed.: Identifikaciya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya. Moscow, Nauka Publ., 1991, 432 p.)
14. Bushuev V.V., Lizalek N.N., Novikov N.L. *Dinamicheskie svoystva ehnergosistem* [Dynamic properties of power systems]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1995, 320 p. (In Russ.).
15. Ignatiev I.V., Bulatov Yu.N. *Modeli i metody nastroyki sistem regulirovaniya vozbuzhdeniya generatorov na osnove `eksperimental'nyh dannyh* [Models and methods of tuning generator excitation control systems on the basis of experimental data]. Bratsk, 2016, 278 p. (In Russ.).
16. Boks Dzh., Dzhenkins G. *Analiz vremennykh ryadov: prognoz i upravlenie* [Time series analysis: forecast and control]. Moscow: Mir Publ., 1974, 200 p. (In Russ.).
17. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Tran Duy Hung. Matched setting for controllers of distributed generation plants operating in railway power supply system. *Sistemnyy. Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2015, no. 1(25), pp. 94–102. (In Russ.).

temy. *Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2015, no. 1(25), pp. 94–102. (In Russ.).

18. 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). IEEE Conference Publications. 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911456.

19. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation. *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1127–1140.

20. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Program complex for identification of electropower systems and optimization of stabilization factors of automatic field regulators. *Sistemnyy. Metody. Tehnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2010, no. 4(8), pp. 106–113. (in Russian)

Критерии авторства

Булатов Ю.Н. получил и оформил научные результаты, и несет ответственность за плагиат.

Contribution

Yuri N. Bulatov has obtained and formalized scientific results, and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Булатов Юрий Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электроэнергетики
и электротехники,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, Россия;
e-mail: bulatovyura@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuri N. Bulatov, Cand

Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Power
and Electrical Engineering,
Bratsk State University, 40 Makarenko St.,
Bratsk 665709, Russia;
e-mail: bulatovyura@yandex.ru



Повышение точности оценки состояния электрической сети в условиях кибератак с использованием медианной фильтрации

© И.А. Лукичева, А.Л. Куликов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Резюме: Цель работы – применение медианной фильтрации для повышения точности оценки состояния электроэнергетических систем в условиях кибератак. Медианная фильтрация – метод нелинейной обработки информации, нашедший широкое применение в цифровой обработке изображений. Она осуществляется посредством движения некоторой апертуры вдоль дискретизированной последовательности и замены значения элемента последовательности в центре апертуры медианой исходных значений отсчетов внутри апертуры. Достоинствами предлагаемого метода является его способность «отбрасывать» значения с большой погрешностью, исключая их влияние на общую оценку состояния энергосистем. Следует отметить простоту реализации метода. Обоснование преимуществ метода медианной фильтрации производилось путем моделирования участка электрической сети в программном комплексе PSCAD. Имитировались измерения токов и напряжений в каждом узле энергосистемы с использованием устройств синхронизированных векторных измерений. На основе полученных измерений производилась оценка состояния методом наименьших квадратов с дополнительной одномерной или двумерной медианной фильтрацией. Результаты оценки состояния указанными способами показали, что метод наименьших квадратов в условиях кибератак на каналы связи является недостаточно эффективным, так как одна грубая ошибка искажает результаты оценки состояния, в то время как медианная фильтрация обеспечивает высокую точность. Предложенный метод медианной фильтрации в отличие от оценки состояния методом наименьших квадратов позволяет снизить воздействие кибератак на энергосистему. Медианная фильтрация является перспективным инструментом для решения задач оценки состояния электрической сети, применение которого приведет к большей надежности электрических сетей в условиях кибератак.

Ключевые слова: интеллектуальные электрические сети, кибербезопасность, киберугроза, кибератака, метод взвешенных наименьших квадратов, медианная фильтрация

Информация о статье: Дата поступления 25 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 18 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Лукичева И.А., Куликов А.Л. Повышение точности оценки состояния электрической сети в условиях кибератак с использованием медианной фильтрации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 310–319. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-310-319.

Improving electrical grid state estimation accuracy under cyber-attacks using median filtering

Irina A. Lukicheva, Alexander L. Kulikov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: The purpose of the work is application of median filtering for increasing the accuracy of power system state estimation (SE) under cyber-attacks. Median filtering (MF) is a nonlinear signal processing technique widely used in digital image processing. Median filtering is performed by letting a window move over the points of a sequence and replacing the value at the window center with the median of the original values within the window. The advantage of the proposed method is the ability of median filtering to discard the values with low accuracy, thus avoiding their impact on general state estimation of power systems. It should be mentioned that the method is easy to implement. MF advantage foundation was performed by modeling of an electrical grid section in the software package PSCAD. The measurements of currents and voltages at each node of the power system were simulated using phasor measurement units. State estimation was performed on the basis of the obtained measurements by the weighted least-squares method with additional one-dimensional and two-dimensional median filtering. The results of state estimation by the specified methods have shown inefficiency of

the weighed least-squares method under cyber-attacks on communication channels, since one rough error in the measurement array “spoils” the overall state estimation results, whereas median filtering provides high accuracy. Unlike the weighed least-squares method used for state estimation the proposed method of median filtering allows to reduce the impact of cyber-attacks on the power system. Thus, median filtering is considered to be a promising tool for solving state estimation tasks, the use of which will lead to higher reliability of electrical grids in case of cyber-attacks.

Keywords: smart grids, cyber security, cyber threat, cyberattack, weighted least-squares method, median filtering

Information about the article: Received December 25, 2018; accepted for publication March 18, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Lukicheva I.A., Kulikov A.L. Improving electrical grid state estimation accuracy under cyber-attacks using median filtering. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 310–319. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-310-319.

Введение

Последние десятилетия электрические сети развиваются в направлении интеллектуализации. Умные или активно-адаптивные сети предполагают использование сенсоров, интеллектуальных измерительных приборов, устройств электроники и сложные системы связи. Значительная зависимость от информации и систем передачи данных увеличивает риск киберугроз. Существует множество мотивов для атаки электрической сети, начиная от экономических причин (например, снижение счета за электроэнергию) до терроризма (запугивание людей путем контроля над электроэнергией и над другими жизненно важными ресурсами) [1]. Оценка состояния – это ключевая процедура систем мониторинга и управления. Она может быть использована как средство защиты от кибератак. Однако большая ошибка в массиве измерений, которая может быть вызвана кибератакой, способна испортить результаты оценки состояния, что может привести к неправильной работе энергосистемы и нарушению электроснабжения потребителей.

Цель данной статьи – исследовать использование медианной фильтрации в алгоритме оценки состояния для повышения точности измерений.

Кибератаки в электроэнергетике

Концепция Smart Grid или активно-адаптивные электрические сети открывают много новых возможностей для электроэнергетической отрасли [1]. Распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, активный потребитель позволяют оптимизировать работу энергосистемы, снижать издержки, повышать ее эффективность и надежность. Устройства синхронизированных векторных измерений, благодаря глобальной системе позиционирования, обеспечивают более частые, точные и надежные синхронизированные измерения в системах передачи, делая возможным создание автоматизированных систем измерений, защиты и управления нового поколения WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection And Control System), используя высокоскоростные каналы передачи. Системы развитых инфраструктур измерений (advanced metering infrastructure) с миллионами интеллектуальных счетчиков в распределительных сетях обеспечивают двунаправленную коммуникацию, делают возможным использование преимуществ систем управления спросом и вовлечения потребителя в управление электрической сетью. В дополнение к сказанному, увеличение числа накопителей электроэнергии, электрических транспортных средств и прочих появляющихся технологий постоянно вносит новые изменения в генерацию, передачу и распределение электроэнергии [2].

Широкое использование информационных, вычислительных и коммуникационных технологий превращает традиционную электрическую сеть в многомерную сложную гетерогенную систему, известную как киберфизическая система. С одной стороны, эта система обладает способностями мониторинга в реальном времени, динамического управления, предоставляет до-



полнительные информационные сервисы [3–6], с другой – наличие большого количества датчиков и развитой коммуникационной инфраструктуры создает дополнительную опасность киберугроз [2, 7, 8].

Проблемы безопасности интеллектуальных электрических сетей возникают как в физической, так и в киберплоскостях [9, 10]. Традиционно энергетическая система обладает присущими ей физическими уязвимостями, которые способны значительно нарушать работы системы и приводить к массовым отключениям. Киберинтеграция накладывает дополнительные проблемы безопасности со стороны информационных технологий [10, 11]. Злоумышленники, имеющие достаточно сведений об электрической сети, могут непосредственно использовать уязвимости системы управления для значительного влияния на интеллектуальную сеть. В зависимости от цели, атака может быть направлена на изменение напряжения, создания нестабильности по частоте, перегрузки линий и сброса нагрузки, вплоть до массовых отключений, вызванных каскадными отключениями [12]. Другое направление кибератак – это влияние на исходные измерения. Вместо прямого манипулирования управляющими сигналами, злоумышленники могут воздействовать на измерения, таким образом, лишая автоматизированную систему или оператора знания о реальном состоянии сети, путем скрывания информации о возникновении нарушений или наоборот, сообщая о несуществующих проблемах, тем самым побуждая к некорректным управляющим воздействиям.

Средством защиты от атак второго типа является оценка состояния. Оценка состояния была впервые описана Швеппе, как алгоритм обработки данных для преобразования избыточных показаний измерительных приборов и другой доступной информации в оценку состояния электроэнергетической системы [16]. Оценка состояния (ОС) является основой для функций мониторинга, анализа и управления энергосистемой [17–20]. ОС действует как фильтр между «сырыми» необработанными измерениями, полученными от измерительных устройств, и всеми функциями системы контроля и управления, нуждающихся в надежных значениях параметров режима электрической сети.

Оценка состояния электрической сети

Состояние электрической сети x представляет из себя вектор, состоящий из значений параметра (как правило – напряжения) в виде амплитуды и фазы (1). Первая шина системы принимается за опорную, и значение фазы параметра на ней принимается равным нулю. Вектор состояния состоит из $N = 2n - 1$ переменных.

$$x = [\delta_2 \ \delta_3 \ \dots \ \delta_n \ V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n]^T, \quad (1)$$

где n – число шин в системе.

Традиционно для ОС используются измерения потоков активной и реактивной мощности, активная и реактивная нагрузка модуля напряжения на шинах. В дополнение к этому могут использоваться измерения модуля токов, а в случае с возможностью получения PMU-измерений – измерений комплексов напряжений и токов. Тогда модель измерений выглядит следующим образом:

$$x = [z_2 \ z_3 \ \dots \ z_m]^T, \quad (2)$$

где m – число доступных измерений.

Состояние и измерения связаны нелинейным уравнением (3):

$$z_k = h(x_k) + v_k, \quad (3)$$

где x_k – вектор погрешностей измерений. Принимается, что ошибки измерений распределены по Гауссовскому закону с медианой равной нулю. Считают, что погрешности измерений некоррелированы между собой, поэтому ковариационная матрица равна диагональной матрице, где по диагонали выстроены дисперсии ошибок, равные погрешности измерительных приборов:

$$R = E[vv^T] = \text{diag}(\delta^2) \quad (4)$$

Главная идея ОС состоит в том, чтобы найти такое максимально близкое состояние системы к реальному. Проблема ОС представляет оптимизационную задачу, решаемую разными способами. Наиболее широко распространен метод взвешенных наименьших квадратов (ВНК).

В соответствии с данным методом взвешенных наименьших квадратов необходимо найти такое состояние системы, которое будет соответствовать наименьшей сумме квадратов разницы между вектором измерений и вектором определяемого состояния. Проблема ОС описывается целевой функцией (5):

$$J(x) = \sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x))^2 / R_{ii} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (5)$$

где m – число измерений.

Для нахождения минимума целевой функции получим первую производную функции и приравняем ее к нулю:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (6)$$

где $H(x) = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right]$ – измерительная матрица Якоби.

Раскладывая (6) в ряд Тейлора относительно x_k , получаем:

$$g(x) = g(x_k) + G(x_k)(x - x_k) + \dots = 0 \quad (7)$$

где $G(x_k) = \left[\frac{\partial g(x_k)}{\partial x} \right] = H^T(x_k) R^{-1} H(x_k)$ – матрица усиления.

Пренебрегая членами высокого порядка, приходим к решению, известному как метод Гаусса-Ньютона:

$$x_{k+1} = x_k - [G(x_k)]^{-1} g(x) \quad (8)$$

где k – номер итерации.

На первой итерации все величины напряжения вектора состояния составляют 1,0 на единицу, а все углы напряжения равны 0 градусов. Затем с учетом измерений на второй итерации состояние пересчитывается. Процесс повторяется до тех пор, пока невязка между векторами состояния и измерений не станет меньше определенного значения.

В случае наличия синхронизированных векторных измерений проблема ОС сводится к линейной и формулируется уравнением (9):

$$z = Hx + e \quad (9)$$



Решением является уравнение (10):

$$\hat{x} = (H^T W^{-1} H)^{-1} H^T W^{-1} z \quad (10)$$

Материалы и методы

Применение медианной фильтрации в оценке состояния. Медианная фильтрация (МФ) – это нелинейный способ обработки сигналов, полезный для подавления шумов. Впервые он был предложен как средство анализа в экономических исследованиях Тьюки в 1971 г. МФ нашла широкое применение в обработке изображений [21], а также в обработке речи [22], анализе биохимических данных [23] и мобильных коммуникационных системах [24]. Медиана последовательности x_1, \dots, x_n , где n – нечетное, это средний член последовательности при условии, что эта последовательность выстроена по нарастающей. Обозначим медиану как Медиана (x_1, \dots, x_n) . Например, Медиана $(5, 6, 3, 9, 1) = 5$. Процесс медианной фильтрации может быть определен как процесс замещения значения в центре окна медианой последовательности оригинальных значений окна при движении окна вдоль последовательности.

В [3] двумерная медианная фильтрация, используемая для обработки изображений, описывается следующим образом:

Предположим, что цифровые изображения представляются набором чисел на квадратной решетке $\{x_{i,j}\}$, where (i, j) , изменяются по \mathbb{Z}^2 или некоторому подмножеству \mathbb{Z}^2 [3]. Двумерный медианный фильтр с апертурой A для изображений $\{x_{i,j}, (i, j) \in \mathbb{Z}^2\}$ определяется как:

$$y_{ij} = \text{median } x_{ij} \triangle [x_{j+r, i+s}; (rs) \in A], (i, j) \in \mathbb{Z}^2. \quad (11)$$

В задаче ОС электрической сети наиболее используемым является метод взвешенных наименьших квадратов. Однако этот метод крайне чувствителен к большим ошибкам измерений. МФ, наоборот, легко справляется с импульсным шумом. Таким образом, имеет смысл объединить эти два метода. Это можно осуществить путем предварительной МФ необработанных измерений и последующей оценкой состояния методом ВНК.

МФ может быть выполнена различными способами. Три из них рассмотрены ниже: одномерная МФ, двумерная МФ версия I, двумерная МФ версия II.

Одномерная МФ описывается выражением (12) для окна шириной равной трем значениям. При этом первое значение – прямое измерение в узле, два другие – не прямые измерения, полученные в результате пересчета напряжения на выбранный узел со знанием напряжений соседних узлов и импедансов ветвей, соединяющих выбранный узел и соседний с ним.

$$U_{1_OC}^{II} = \text{медиана } (U_1, U_{1(2)}, U_{1(3)}), \quad (12)$$

где U_1 – прямое измерение вектора напряжения в узле 1;

$U_{1(2)}$ – вектор напряжения, полученный относительно узла 2:

$$\bar{U}_{1(2)} = (\bar{U}_2 \cdot \frac{\bar{Y}_{12}}{2} - \bar{I}_{21}) \cdot \bar{Z}_{12} + \bar{U}_2, \quad (13)$$

где \bar{U}_2 – прямое измерение вектора напряжения в узле 2; \bar{Y}_{12} – емкостная проводимость линии 1-2; \bar{I}_{21} – вектор тока, протекающий по линии 1-2, в направлении к первому узлу; \bar{Z}_{12} – комплексное сопротивление линии 1-2.

$\bar{U}_{1(3)}$ – вектор напряжения, полученный относительно узла 3, определяется аналогично $\bar{U}_{1(2)}$.

В случае двумерной МФ (вариант I) использовалось квадратное окно 3x3:

$$U_{1_OC}^{II} = \text{медиана} \begin{bmatrix} U_1(t_1) & U_1(t_2) & U_1(t_3) \\ U_{1(2)}(t_1) & U_{1(2)}(t_2) & U_{1(2)}(t_3) \\ U_{1(3)}(t_1) & U_{1(3)}(t_2) & U_{1(3)}(t_3) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $U_1(t_1), U_1(t_2), U_1(t_3)$ – прямое измерение вектора напряжения в узле 1 в моменты времени t_1, t_2, t_3 соответственно; $U_{1(2)}(t_1), U_{1(2)}(t_2), U_{1(2)}(t_3)$ – вектор напряжения, полученный относительно узла 2 в моменты времени t_1, t_2, t_3 соответственно; $U_{1(3)}(t_1), U_{1(3)}(t_2), U_{1(3)}(t_3)$ – вектор напряжения, полученный относительно узла 2 в моменты времени t_1, t_2, t_3 соответственно;

В случае двумерной МФ (вариант II) использовалось квадратное окно 3x1:

$$U_{1_OC}^{II} = \text{медиана} \begin{bmatrix} \text{медиана}(U_1(t_1), U_{1(2)}(t_1), U_{1(3)}(t_1)) \\ \text{медиана}(U_1(t_2), U_{1(2)}(t_2), U_{1(3)}(t_2)) \\ \text{медиана}(U_1(t_3), U_{1(2)}(t_3), U_{1(3)}(t_3)) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где $U_1(t_1), U_1(t_2), U_1(t_3)$ – прямое измерение вектора напряжения в узле 1 в моменты времени t_1, t_2, t_3 соответственно; $U_{1(2)}(t_1), U_{1(2)}(t_2), U_{1(2)}(t_3)$ – вектор напряжения, полученный относительно узла 2 в моменты времени t_1, t_2, t_3 соответственно; $U_{1(3)}(t_1), U_{1(3)}(t_2), U_{1(3)}(t_3)$ – вектор напряжения, полученный относительно узла 2 в моменты времени t_1, t_2, t_3 соответственно.

Моделирование оценки состояния, выполняемой методом ВНК с и без предварительной медианной фильтрации. Для проверки предложенного алгоритма была создана модель участка электрической сети (рис. 1) в программном комплексе PSCAD.

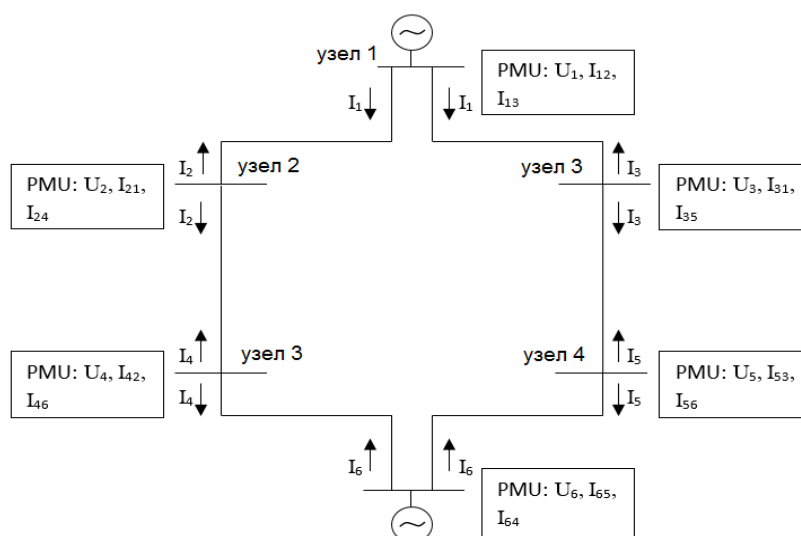


Рис. 1. Модель участка сети
 Fig. 1. Model of a grid section



Была рассмотрена ситуация потери сигнала, вызванная кибератакой: в моменты времени $t = 0,46$ с сигнал U_1 равнялся нулю и в момент времени $t = 0,48$ с сигнал I_{12} равнялся нулю. Токи во всех линиях и напряжения на всех шинах измерялись устройствами синхронизированных векторных измерений. Предполагалось, что измерительные приборы дают ошибку измерений равную погрешности измерительного прибора. После измерения параметров режима электрической сети производилась ОС с предварительной МФ и без МФ. Результаты двух вариантов ОС представлены на рис. 2, на примере модуля сигнала U_1 .

Результаты

На рис. 3 кривая «реал» отображает истинные значения напряжения без каких-либо искажений. Кривая ВНК показывает значения напряжения, рассчитанные с помощью метода ВНК. Кривая «МФх1+ВНК» обозначает напряжение, рассчитанное методом ВНК с предварительной одномерной МФ, «МФх2_I+ВНК» – с двумерной МФ (вариант I), «МФх2_II+ВНК» – с двумерной МФ (вариант II).

Рис. 3 иллюстрирует, что метод ВНК обладает большой погрешностью в случае потери сигнала, а именно – до 20%. В то время как для методов с предварительной обработкой сигнала с помощью МФ погрешность составляет 1,2%. Средняя ошибка оценки для метода ВНК 1,4%, а для метода ВНК с МФ – около 0,25%.

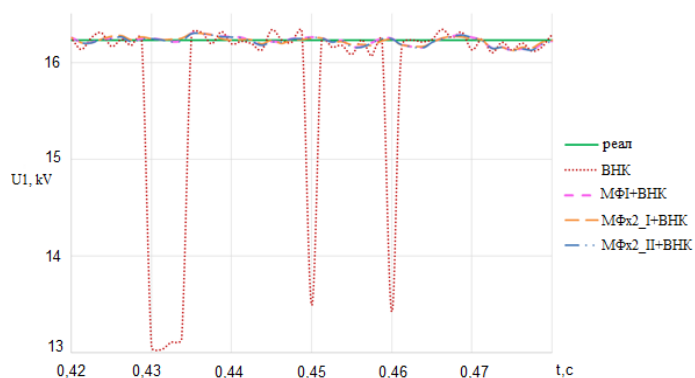


Рис. 2. Результаты оценки амплитуды напряжения на шине 1 U_1 с и без предварительной медианной фильтрации

Fig. 2. Results of voltage amplitude estimation on the bus 1 U_1 with and without preliminary median filtering

Сравнение результатов разных алгоритмов ОС по максимальной и средней ошибке результатов показано в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Средняя ошибка результатов оценки состояния, выполненной методами взвешенных наименьших квадратов с и без предварительной медианной фильтрации

Table 1

Mean error of state estimation using weighted least-squares method with and without preliminary median filtering

Среднее значение ошибки	Модуль U_1	Модуль U_2	Модуль U_3	Модуль U_4	Модуль U_5	Модуль U_6
ВНК, %	1,517	1,446	1,453	1,352	1,361	1,313
ВНК +МФх1, %	0,296	0,303	0,305	0,304	0,306	0,298
ВНК +МФх2_I, %	0,187	0,198	0,200	0,199	0,200	0,187
ВНК +МФх2_II, %	0,194	0,209	0,207	0,210	0,209	0,195

Таблица 2

Максимальная ошибка результатов оценки состояния, выполненной методами взвешенных наименьших квадратов с и без предварительной медианной фильтрации

Table 2

Maximum error of state estimation using weighted least-squares method with and without preliminary median filtering

Максимальное значение ошибки	Модуль U_1	Модуль U_2	Модуль U_3	Модуль U_4	Модуль U_5	Модуль U_6
ВНК, %	19,672	19,446	19,916	16,883	17,434	15,904
ВНК +МФх1, %	0,887	0,946	0,936	0,981	0,972	0,925
ВНК +МФх2_I, %	1,059	1,113	1,150	1,127	1,163	1,091
ВНК +МФх2_II, %	0,968	1,029	1,047	1,036	1,063	0,995

С точки зрения средней ошибки наилучший результат был показан методом ВНК с предварительной обработкой – данный двумерной МФ (вариант I). С точки зрения максимальной ошибки лучший результат был получен с помощью предварительной обработки одномерной МФ.

Заключение

Моделирование ОС методом ВНК в предварительной обработке измерений медианной фильтрацией показало, что МФ улучшает точность ОС. Так как МФ не учитывает измерения с большой погрешностью, она может быть использована как средство защиты от кибератак, если их воздействие создает большие ошибки в массиве измерений. Следует отметить, что МФ легко реализуема на существующем оборудовании и не требует больших вычислительных затрат. Таким образом, применение МФ может снизить вычислительную нагрузку при выполнении ОС.

Библиографический список

1. Haibo He, Jun Yan, Cyber-physical attacks and defences in the smart grid: a survey, IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications. 2016. Vol. 1(1). DOI: 10.1049/iet-cps.2016.0019
2. Tang Y., Chen Q., Li M., Wang Q, Ni M., Yun Fu X. Challenge and Evolution of Cyber Attacks in Cyber Physical Power System, Proceedings of IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference. 2016. P. 857–862.
3. Marris E. Upgrading the grid. Nature 2008. Vol. 454 (7204). P. 570–573.
4. Amin S.M. For the good of the grid. IEEE Power Energy Mag. 2008. Vol. 6. No. 6. P. 48–59.
5. Guidelines for Smart Grid Cyber Security, Draft NISTIR 7628 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pdfdrive.com/nistir-7628-guidelines-for-smart-grid-cyber-security-e20410294.html> (дата обращения: 12.10.2018).
6. NETL, Understanding the Benefits of the Smart Grid, Jun. 2010. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/jece/2013/712376/> (дата обращения: 5.10.2018).
7. Балашов О.В. Информационная безопасность в интеллектуальных электрических сетях // Энергоэксперт. 2016. № 1. С. 77–79.
8. Папков Б.В., Куликов А.Л., Осокин В.Л. Проблемы кибербезопасности электроэнергетики. Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». М.: Энергопрогресс, 2017. Вып. 9 (225). 96 с.
9. Govindarasu M., Hann A., Sauer P., White paper: cyber–physical systems security for smart grid. 2012.
10. Mo Y., Kim T.H.J., Brancik K., Cyber–physical security of a smart grid infrastructure. Proc. IEEE. 2012. Vol. 100. (1). P. 195–209.
11. US-DOE, NERCH, High-Impact, Low-Frequency Event Risk to the North American Bulk Power System, Jun. 2010. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/High> (дата обращения: 5.10.2018).
12. Папков Б.В., Куликов А.Л., Осокин В.Л. Киберугрозы и кибератаки в электроэнергетике. Н.Новгород: НИУ РАН-ХиГС, 2017. 80 с.
13. Wang D., Guan X., Liu T., Gu Y., Sun Y., Liu Y., A Survey on Bad Data Injection Attack in Smart Grid, Proceedings of Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013. P. 1–6.
14. Manandhar K., Hu F., Cao X., Liu Y., Combating False Data Injection Attacks in Smart Grid Using Kalman Filter,



- Proceedings of International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). 2014. P. 1–5.
15. Pandey K., Misra M., Cyber Security Threats – Smart Grid Infrastructure, Proceedings of National Power Systems Conference. 2016. P. 1–6.
16. Power system static-state estimation, Part III: Implementation. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems. 1970. Vol. 1. P. 130–135. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/3459954_Power_System_Static (дата обращения: 12.10.2018).
17. Yu K.C., Watson N.R., Arrillaga J., Error analysis in static harmonic state estimation: A statistical approach. IEEE Trans. Power Deliv. 2005. Vol. 20. P. 1045–1050.
18. Jiang W.Q., Vittal V., Heydt G.T. A distributed state estimator utilizing synchronized phasor measurements. IEEE Trans. Power Syst. 2007. Vol. 22. P. 563–571.
19. Wang B., He G.Y., Liu K.C., A new scheme for guaranteed state estimation of power system. IEEE Trans. Power Syst. 2013. Vol. 28. P. 4875–4876.
20. Guo Y., Wu W.C., Zhang B.M., Sun H.B., A fast solution for the lagrange multiplier-based electric power network parameter error identification model. Energies. 2014. Vol. 7. P. 1288–1299.
21. Huang T.S., Two-Dimensional Digital Signal Processing II. Transforms and Median Filters. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1981. P. 161–164.
22. Jayant N.S., Average and median-based smoothing techniques for improving digital speech quality in the presence of transmission errors. IEEE Trans. on Communications. September. 1976. Vol. 24. No. 9. P. 1043–1045.
23. Bangham J.A., Data-sieving hydrophobicity plots, Analytical Biochemistry. 1988. Vol. 174. P. 142–145.
24. Tepedelenioglu C., Sidiropoulos N. and Giannak J.B., Median Filtering For Power Estimation In Mobile Communication Systems in Proc. 2001 Third IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. P. 229–231.

References

1. Haibo He, Jun Yan, Cyber-physical attacks and defences in the smart grid: a survey, IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 2016, vol. 1(1). DOI: 10.1049/iet-cps.2016.0019
2. Tang Y., Chen Q., Li M., Wang Q, Ni M., Yun Fu X. Challenge and Evolution of Cyber Attacks in Cyber Physical Power System, Proceedings of IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference, 2016, pp. 857–862.
3. Marris E. Upgrading the grid. Nature, 2008, vol. 454 (7204), pp. 570–573.
4. Amin S.M. For the good of the grid. IEEE Power Energy Mag. 2008, vol. 6, no. 6, pp. 48–59.
5. Guidelines for Smart Grid Cyber Security, Draft NISTIR 7628. URL: <https://www.pdfdrive.com/nistir-7628-guidelines-for-smart-grid-cyber-security-e20410294.html> (available at: 12 October 2018).
6. NETL, Understanding the Benefits of the Smart Grid, Jun. 2010. URL: <https://www.hindawi.com/journals/jece/2013/712376/> (available at: 5 October 2018).
7. Balashov O.V. Information security in the smart grid. *Energoekspert*, 2016, no. 1, pp. 77–79. (In Russ.).
8. Papkov B.V., Kulikov A.L., Osokin V.L. *Problemy kiberbezopasnosti elektroenergetiki. Biblioteka elektrotehnika, prilozhenie k zhurnal "Energetik"* [The problems of cybersecurity of the electrical engineering. The library of an electrical engineer. Appendix to the magazine "Energetik"]. Moscow: Energoprogress Publ., 2017, Issue 9 (225), 96 p. (In Russ.).
9. Govindarasu M., Hann A., Sauer P., White paper: cyber-physical security for smart grid systems, 2012.
10. Mo Y., Kim T.H.J., Brancik K., Cyber-physical security of a smart grid infrastructure. Proc. IEEE, 2012, vol. 100. (1), pp. 195–209.
11. US-DOE, NERCH, High-Impact, Low-Frequency Event Risk to the North American Bulk Power System, Jun. 2010. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/High> (available at: 5 October 2018).
12. Papkov B.V., Kulikov A.L., Osokin V.L. *Kiberugrozy i kiberataki v elektroenergetike* [Cyber threats and cyberattacks in electrical engineering]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod Institute of management — branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 2017, 80 p. (In Russ.).
13. Wang D., Guan X., Liu T., Gu Y., Sun Y., Liu Y., A Survey on Bad Data Injection Attack in Smart Grid, Proceedings of Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013, pp. 1–6.
14. Manandhar K., Hu F., Cao X., Liu Y., Combating False Data Injection Attacks in Smart Grid Using Kalman Filter, Proceedings of International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 2014, pp. 1–5.
15. Pandey K., Misra M., Cyber Security Threats – Smart Grid Infrastructure, Proceedings of National Power Systems Conference, 2016, pp. 1–6.
16. Power system static-state estimation, Part III: Implementation. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, 1970, vol. 1, pp. 130–135. URL: https://www.researchgate.net/publication/3459954_Power_System_Static (available at: 12 October 2018).
17. Yu K.C., Watson N.R., Arrillaga J., Error analysis in static harmonic state estimation: A statistical approach. IEEE Trans. Power Deliv, 2005, vol. 20, pp. 1045–1050.
18. Jiang W.Q., Vittal V., Heydt G.T. A distributed state estimator utilizing synchronized phasor measurements. IEEE Trans. Power Syst, 2007, vol. 22, pp. 563–571.

19. Wang B., He G.Y., Liu K.C., A new scheme for guaranteed state estimation of power system. IEEE Trans. Power Syst, 2013, vol. 28, pp. 4875–4876.
20. Guo Y., Wu W.C., Zhang B.M., Sun H.B., A fast solution for the lagrange multiplier-based electric power network parameter error identification model. Energies, 2014, vol. 7, pp. 1288–1299.
21. Huang T.S., Two-Dimensional Digital Signal Processing II. Transforms and Median Filters. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981, pp. 161–164.
22. Jayant N.S., Average and median-based smoothing techniques for improving digital speech quality in the presence of transmission errors. IEEE Trans. on Communications. September, 1976, vol. 24, no. 9, pp. 1043–1045.
23. Bangham J.A., Data-sieving hydrophobicity plots, Analytical Biochemistry, 1988, vol. 174, pp. 142–145.
24. Tepedelenlioglu C., Sidiropoulos N. and Giannak J.B., Median Filtering For Power Estimation In Mobile Communication Systems in Proc. 2001 Third IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, pp. 229–231.

Критерии авторства

Лукичева И.А., Куликов А.Л. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Lukicheva I.A., Kulikov A.L. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лукичева Ирина Александровна,
аспирант кафедры электроэнергетики,
электроснабжения и силовой электроники,
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева,
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, Россия;
e-mail: Lukicheva.ir@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina A. Lukicheva,
Postgraduate student of the Department
of Electric Power Engineering,
Electric Power Supply and Power Electronics,
Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev,
24 Minin St., Nizhny Novgorod 603155, Russia;
e-mail: Lukicheva.ir@gmail.com

Куликов Александр Леонидович,
доктор технических наук,
профессор кафедры электроэнергетики,
электроснабжения и силовой электроники
Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева,
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, Россия;
e-mail: inventor61@mail.ru

Alexander L. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Electric
Power Engineering,
Electric Power Supply and Power Electronics,
Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev,
24 Minin St., Nizhny Novgorod 603155, Russia;
e-mail: inventor61@mail.ru



Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением в условиях многокритериальности с учетом неточно выраженных предпочтений лиц, принимающих решение

© П.С. Панкратьев

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

Резюме: Цель – рассмотреть задачу принятия решений по размещению тепловой электростанции. Традиционно задача выбора места размещения любой электростанции состоит из двух основных этапов – выбора пункта размещения и варианта мощности станции; первый из перечисленных наиболее сложен ввиду таких факторов как многокритериальность, высокая степень неопределенности информации, слабая структурированность. Особенно усложняет выбор пункта размещения необходимость предварительного принятия решений по дальнейшим аспектам задачи, таким как выбор площадки и мощность станции. Для определения лучшего пункта размещения электростанции формулируется многокритериальная задача с выделением двух уровней альтернатив – пунктов размещения и вариантов реализации электростанции. Ввиду того, что условия анализа альтернатив двух уровней отличаются, предложено применить два метода многокритериального анализа. Предложена методика двухуровневого многокритериального анализа альтернатив с использованием метода многокритериальной теории полезности и метода анализа иерархий. Приводится пример выбора пункта размещения тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением. С этой целью определяются критерии задачи выбора на двух уровнях анализа. Также внимание уделено применению метода многокритериальной теории полезности для случая определения однокритериальной функции ценности немоногоотонного вида в контексте поиска «оптимальной» мощности тепловой электростанции.

Ключевые слова: системный анализ в энергетике, многокритериальность, многокритериальная теория полезности, метод анализа иерархий, размещение электростанции, децентрализованное электроснабжение

Информация о статье: Дата поступления 15 января 2019 г.; дата принятия к печати 13 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Панкратьев П.С. Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением в условиях многокритериальности, с учетом неточно выраженных предпочтений лиц, принимающих решение. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 320–334. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-320-334.

Thermal power plant location in the region with decentralized power supply under multi-attribute conditions considering imprecisely expressed preferences of decision makers

Pavel S. Pankratiev

Bratsk state University, Bratsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to consider the problem of decision-making on location of a thermal power plant. Traditionally, the problem of choosing the location of any power station consists of two main stages – location selection and a station capacity option. The first stage is the most difficult due to such factors as multi-criteria, high degree of information uncertainty, weak structuring. The need for anticipatory decision-making on further aspects of the problem including site selection and station capacity particularly complicates the location choice. To determine the best location of the power plant a multi-attribute problem is formulated distinguishing two levels of alternatives – location points and power plant implementation options. Due to the fact that analysis conditions of alternatives of two levels differ, it is proposed to apply two methods of multi-attribute analysis. A methodology of two-level multi-attribute analysis of alternatives that uses the method of multi-attribute utility theory and hierarchy analysis is proposed. An example of choosing a location for a thermal

power plant in the area with decentralized power supply is given. Towards this end in view, the criteria of the selection problem are defined at two levels of analysis. Attention is also paid to the application of the method of multi-attribute utility theory for the case of determining the single-criterion value function of a non-monotonic type in terms of searching for the "optimal" capacity of a thermal power plant.

Keywords: system analysis in power engineering, multi-attribute condition, multi-attribute utility theory, hierarchy analysis method, power plant location, decentralized power supply

Information about the article: Received January 15, 2019; accepted for publication March 13, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Pankratiev P.S. Thermal power plant location in the region with decentralized power supply under multi-attribute conditions considering imprecisely expressed preferences of decision makers. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 320–334. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-320-334.

Введение

Согласно «Энергетической стратегии России» на период до 2030 г. и «Схеме территориального планирования Российской Федерации в области энергетики», в ближайшие годы темпы строительства электростанций снижаться не будут [1, 2].

Выбор места размещения электростанции является сложной комплексной задачей, решение которой должно учитывать множество факторов. В работах [3–7] были приведены результаты предынвестиционных исследований по размещению гидроэлектростанции в условиях многокритери-

альности на основе разработанной методики двухуровневого многокритериального анализа альтернатив; было дано обоснование использования указанной методики.

Особенностью задачи двухуровневого выбора места (пункта) размещения электростанции является различная степень детализации информации по критериям на первом и втором уровнях анализа [5–7]. При оценке альтернатив на первом уровне преобладают критерии с качественным измерением, при оценке – на втором – с количественным измерением.

Методика анализа альтернатив

Дадим краткое описание разработанной с участием автора методики [3–7]. Сначала формируется иерархия целей и критериев с выделением двух уровней анализа.

Методом MAUT (Multi-Attribute Utility Theory – «Многокритериальная теория полезности») на втором уровне анализа предварительно оцениваются варианты реализации электростанции в каждом пункте (например: площадки, мощности); при этом проверяются условия применимости метода, определяются однокритериальные

функции ценности, шкалирующие коэффициенты, а также вид многокритериальной функции ценности. В результате определяются лучшие варианты реализации электростанции при учете многих критериев.

Далее на первом уровне анализа пункты сравниваются методом АНР (Analytic Hierarchy Process – «Метод анализа иерархий») в предположении, что именно лучшие варианты будут реализованы. Лучшим признается пункт размещения с наибольшей многокритериальной оценкой.

Анализ района размещения электростанций и подготовка исходных данных для применения методики

Тепловые электростанции (ТЭС) на сегодняшний день являются наиболее распространенным типом электростанций в России [8]. Ввиду большого количества раз-

веданных и разрабатываемых месторождений каменного и бурого углей ожидается, что строительство таких электростанций по-прежнему будет продолжаться [1, 2].

Для проведения исследования был выбран район с децентрализованным электроснабжением в Момском улусе, Республика Саха (Якутия), показано на рис. 1, в котором намечено три пункта строительства тепловой электростанции (П1-П3) вблизи реки Индигирки. Дадим разъяснения по каждому из намеченных пунктов.

Пункт П1 намечен между поселками Хонуу и Белая Гора в связи со следующими причинами. Во-первых, поблизости расположено три разрабатываемых месторождения каменного угля, что позволило бы использовать местный уголь на построенной станции. Во-вторых, все три пункта намечены в Зырянском угленосном бассейне, где в перспективе потребуются производить добычу угля и на что потребуются дополнительная мощность. В-третьих, имеются небольшие запасы золота: пункт П1 расположен вблизи нескольких россыпных узлов. В-четвертых, пункт расположен вблизи месторождений цветного металла – олова. В этой связи может потребоваться дополнительная

мощность для освоения и добычи полезных ископаемых. Кроме того, в перспективе мощность может потребоваться и для обеспечения жителей прилегающих населенных пунктов в дополнительной мощности.

Пункт П3 намечен между п. Хонуу и богатейшими месторождениями золота, как перспективными, так и уже разрабатываемыми. Кроме того, пункт расположен «на борту» угольного разреза, что решает проблему поставки топлива на станцию. Перспективу пункта также определяет планируемое строительство стратегической железнодорожной линии Якутск – Мома – Магадан. Помимо этого, от п. Хонуу Индигирка судоходна, соответственно, в перспективе поселок может стать крупным транспортным узлом.

Пункт П2 намечен как промежуточный вариант между пунктами П1 и П3 с целью повлиять на развитие двух регионов сразу. На 100 км западнее пункта П2, кроме того, расположено месторождение драгоценных цветных камней.

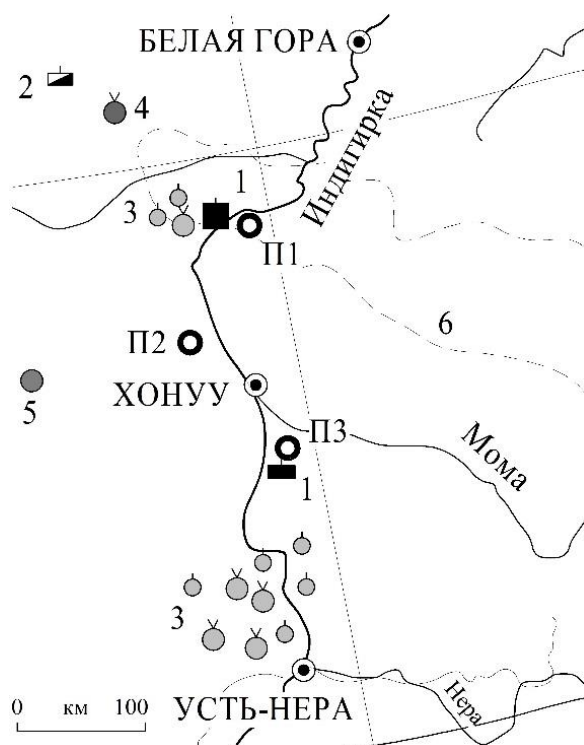


Рис. 1. Ситуационный план района размещения: 1 – месторождение каменного угля; 2 – месторождение бурого угля; 3 – месторождение золота; 4 – месторождение олова; 5 – месторождение драгоценных цветных камней; 6 – перспективная нефтегазовая область
Fig. 1. Site plan of the location area: 1 – deposit of coal t; 2 – deposit of brown coal; 3 – deposit of gold; 4 – deposit of tin; 5 – deposit of precious colored stones; 6 – promising oil and gas region

Формирование иерархии целей и критериев

Для проведения анализа необходимо определить цели и критерии задачи, для чего строится соответствующая иерархия. При построении иерархии целей и критериев необходимо использовать такие критерии, которые наиболее полно позволяют оценить имеющиеся альтернативы. При этом перечень критериев (при необходимости) может быть расширен или, наоборот, сужен – в зависимости от требуемой степени детализации поставленной задачи. Также необходимо отметить, что добавление критериев в иерархию имеет смысл лишь в том случае, если оценки для каждого пункта по данному критерию отличаются. Если отличий с определенной степенью приближения нет, добавлять таковые критерии нет необходимости, поскольку в данном случае все пункты относительно данного критерия оказываются в равных условиях и критерий может быть исключен.

Рассмотрим пример выбора пункта размещения ТЭС в предынвестиционной фазе в условиях определенности, используя разработанную с участием автора методику. Пример иерархии целей и критериев для задачи выбора пункта размещения тепловой электростанции представлен на рис. 2.

Дадим разъяснения по данной иерархии. Цель «минимизация экономического воздействия» и «максимизация экономического эффекта» характеризуется тремя критериями:

1. Установленная мощность ТЭС. На уровне оценки вариантов станции (вариантов мощности) наивысший балл будет присвоен площадке, имеющей наиболее «оптимальную» мощность с точки зрения имеющейся и перспективной производственной, хозяйственной, жилищной и транспортной инфраструктуры.

2. Стоимость строительства ТЭС. Площадка (или пункт) получит наивысший балл, если стоимость строительства будет наименьшей.

3. Условия строительства: чем благоприятнее будут условия строительства в районе, тем выше станет оценка у альтер-

нативы. Под условиями строительства подразумевается наличие транспортной (авто- и железные дороги, аэродромы, речные пути и морские порты, и т.п.), хозяйственной (здания, сооружения, жилые поселки) и другой инфраструктуры, доступной для использования при строительстве объекта, что избавляет от необходимости ее возведения. На выбор альтернативы влияние оказывает и наличие строительного обеспечения – материалов, предприятий стройиндустрии. Близость к станции населенных пунктов уменьшает проблему подбора работников, а также сокращает расходы на обеспечение квалифицированными кадрами [9].

Цель «минимизация экологического воздействия» характеризуется критерием «воздействие на растительный и животный мир». При строительстве ТЭС неизбежно сменится микроклимат в районе, что может привести к пагубным последствиям для растений и животных. Негативное воздействие может быть выявлено, например, по специальным картам, на которых отмечены заповедники, территории обитания редких видов животных, растений. Чем меньшее влияние размещаемая ТЭС оказывает на жизнь животных и растений, тем выше будет оценка по критерию.

Цель «минимизация социального воздействия» характеризуется критерием «мнение заинтересованных групп людей». При строительстве любого энергетического объекта необходимым условием является учет мнения различных групп заинтересованных лиц (группы лиц, чьи интересы лежат в плоскости охраны окружающей среды и защищенности коренного населения, группы деловых людей, группы лиц-потребителей будущей энергии и т.п.). Оценка по критерию будет наивысшей, если пункт строительства станции будет иметь наименьшую степень недовольства групп заинтересованных лиц.

Цель «максимизация социально-экономического воздействия» характеризуется критерием «оценка перспектив развития района». Размещаемая ТЭС должна в наи-

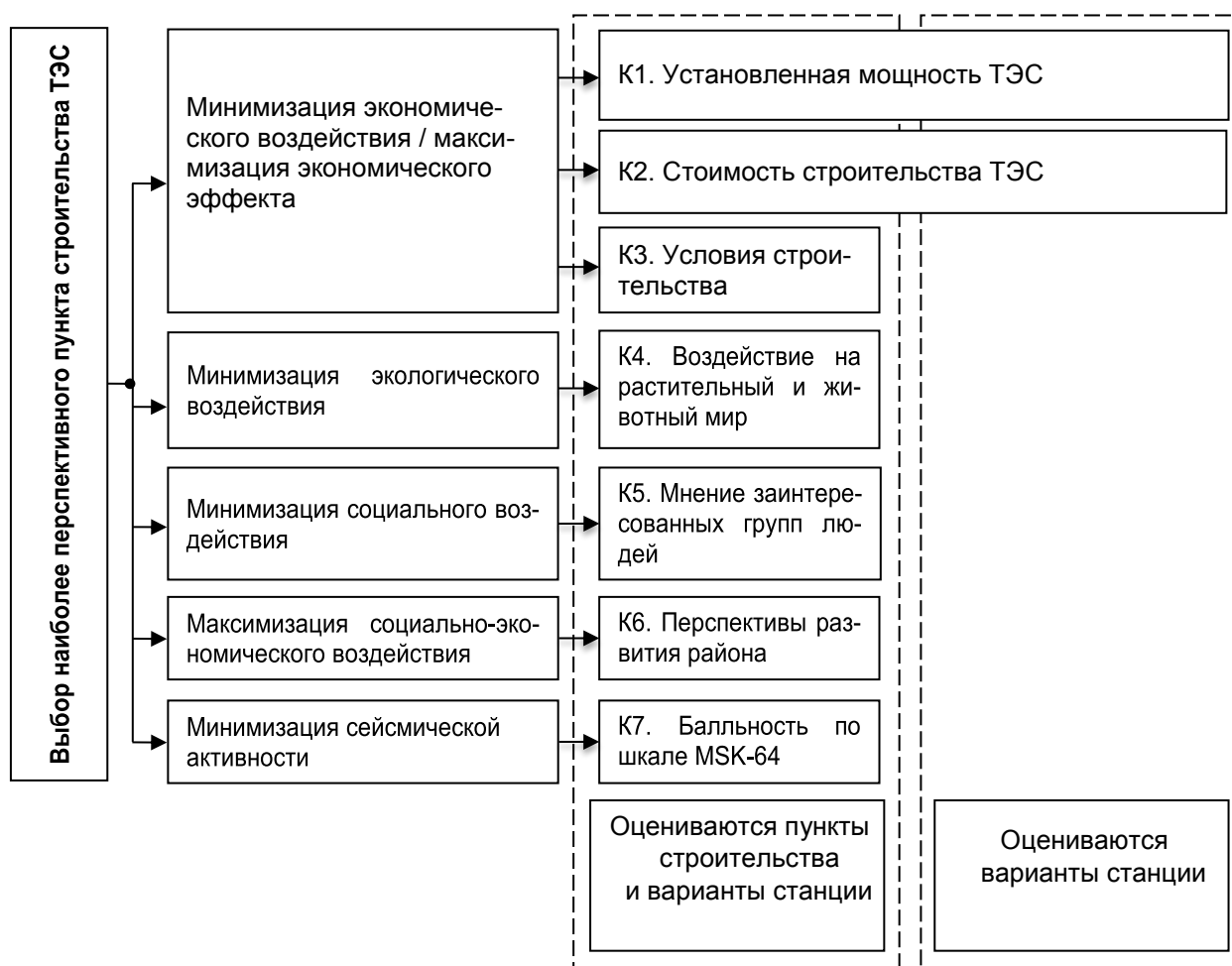


Рис. 2. Иерархия целей и критериев задачи выбора пункта размещения тепловых электростанций
Fig. 2. Hierarchy of goals and criteria for the selection problem of TPP location

большей степени обеспечивать развитие района с учетом перспективных нагрузок. Для назначения оценок по этому критерию могут быть привлечены различные картографические материалы, например с обозначением на них жилых поселков, городов, промышленных и градообразующих предприятий и т.п. Чем большее количество объектов будет находиться в зоне развития, тем больше будет оценка альтернативы по критерию.

Цель «минимизация сейсмической активности» характеризуется критерием «балльность по шкале MSK-64». Неоспоримым является важность учета такого фактора, как сейсмическая активность, особенно когда строительство тепловой станции планируется в сейсмически активных

районах. В каждом пункте строительства, в общем случае, может наблюдаться отличная друг от друга сейсмическая активность, которая уже при детальном проектно-исследовательских работах должна быть уточнена с использованием материалов, проб, данных, полученных непосредственно на месте предполагаемого строительства. На предынвестиционной же стадии анализа такую активность можно оценить, используя специальные карты сейсмической активности, на которых отображено зонирование территории по степени сейсмической активности и где каждой такой зоне присвоен соответствующий балл. Оценка по критерию примет наивысшее значение, если пункт будет расположен как можно в менее сейсмически активном районе.

Обобщенный алгоритм действий при применении метода MAUT

В соответствии с методикой [5–7], на первом этапе проводится анализ площадок (вариантов, мощностей станций) на втором уровне анализа. Анализ проводится с помощью метода многокритериального анализа MAUT [10–12]. Согласно методу, порядок действий предстоит следующий. Сначала производится проверка условий-аксиом, при выполнении которых может быть получена многокритериальная функция полезности в аддитивном (1) или мультипликативном (2) виде [10, 11]:

$$u(y) = u(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(y_i), \quad (1)$$

$$ku(y) + 1 = ku(y_1, y_2, \dots, y_n) + 1 = \prod_{i=1}^n [kk_i u_i(y_i) + 1], \quad (2)$$

где $u_i(y_i)$ – однокритериальная функция полезности; y_i – исход (оценка) альтернативы

по критерию i ; k, k_i – шкалирующие коэффициенты.

Если рассматривается выбор в условиях определенности, функцию полезности $u(y)$ называют функцией ценности $v(y)$. Выполнение условия взаимной независимости критериев по предпочтению позволяет получить многокритериальную функцию ценности (МФЦ) в аддитивном виде (3) [10, 11]:

$$v(y) = v(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(y_i), \quad (3)$$

где $v_i(y_i)$ – однокритериальная функция ценности.

Далее определяются однокритериальные функции ценностей по каждому критерию, определяются шкалирующие коэффициенты (коэффициенты важности критериев) и в заключении – МФЦ, определяющая важность каждой альтернативы второго уровня (АВУ).

Определение однокритериальных функций ценности и шкалирующих коэффициентов при неявно заданных предпочтениях лиц, принимающих решение

Процедура определения однокритериальных функций ценности обычно проводится при помощи опроса лиц, принимающих решение (ЛПР): аналитик задает ряд вопросов и они дают ответы в соответствии со своими ценностными ориентирами в отношении сформулированных критериев оценки. В результате этого опроса строится однокритериальная функция ценности [10, 11].

При формулировании ответов ЛПР не всегда способны дать однозначный ответ, что в конечном итоге может привести к «интервальной» однокритериальной функции ценности: одному и тому же значению по критерию может быть присвоена не одна определенная оценка ценности, а множество (интервал) таких оценок. Причины таких затруднений при ответах могут носить как чисто субъективный характер, так и объективный, обусловленный внешними факторами и неопределенностью исходной ин-

формации. Однокритериальные функции ценностей для двух критериев (K_1, K_2) приведены на рис. 3; первая функция определена с учетом неявных предпочтений экспертов и ЛПР.

Стоит дать пояснение к функции ценностей по критерию K_1 . Во-первых, функция является немонотонной – сначала возрастает, а затем убывает. В связи с этим по мнению ЛПР в районе существует некоторая «оптимальная» мощность, которая «покроет» все существующие и – на определенный период времени – перспективные нагрузки. Этому значению мощности присвоена наивысшая ценность «1». Во-вторых, данная однокритериальная функция ценностей (ОФЦ) как бы «размывается» и одному и тому же значению по шкале критерия присваивается разная оценка ценности в связи с неуверенностью в ответах, которые дают ЛПР и эксперты при опросе аналитиком.

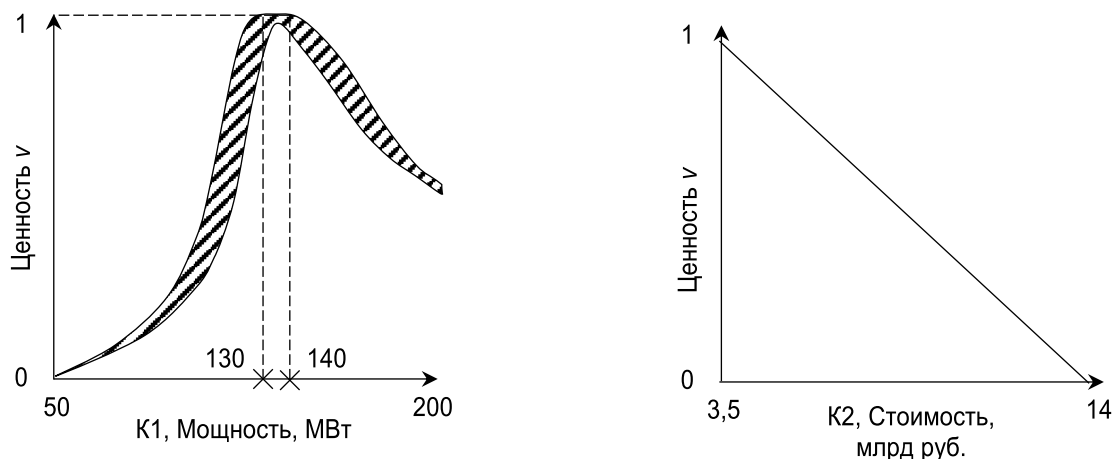


Рис. 3. Однокритериальные функции ценностей
Fig. 3. One-criteria value functions

Характерная особенность районов с децентрализованным электроснабжением – распределенная генерация: множество потребителей, распределенных на относительно большой территории, получают энергию от своих собственных источников энергии (например, от дизельных электростанций). Совокупность таких потребителей в перспективе может получать энергию от размещаемой тепловой станции. Соединенные между собой, такие нагрузки образуют множество вариантов сетей, диапазон суммарной мощности которой варьируется в некоторых пределах. Иная ситуация возникла бы при рассмотрении района с централизованным электроснабжением, когда вместо подсчета суммы нагрузок оперировать было бы необходимо с величиной дефицита мощности в энергосистеме.

Таким образом, варианты мощностей от 50 до 200 МВт получены в результате анализа имеющихся и перспективных нагрузок в изолированном районе и зависят от множества вариантов потребителей (нагрузок), входящих или исключенных из сети, питаемой от размещаемой электростанции в каждом отдельном пункте (такие нагрузки, как жилые дома, горно-обогатительные комбинаты, объекты хозяйственной, производственной инфраструктуры и прочие).

При построении ОФЦ по критерию K2 стоимость 1 МВт установленной мощности ТЭС принята равной 0,07 млрд. руб. [13].

Процедуру определения шкалирующих коэффициентов с учетом особенностей критерия K1 для наглядности изобразим в совмещенном с однокритериальными функциями ценностей виде (рис. 4).

При определении шкалирующих коэффициентов, согласно методу, шкалы по каждому критерию располагаются в направлении от худшего значения к лучшему относительно начала координат (рис. 4, квадрант I). Поскольку ОФЦ по критерию K1 имеет немонотонный вид, ЛПР было предложено избрать такое значение по критерию K1 в промежутке от 50 до 130 МВт (от 0 до 1 по ценности), чтобы достигнуть отношения безразличия в выборе между альтернативами A1 и A2 («отношение равновесия ценностей»). Здесь ЛПР и эксперты, согласно поставленным условиям задачи, также ведут себя неуверенно и точно не могут определить такое значение, поэтому аналитик фиксирует приблизительный их ответ в виде интервала значений 120–125 МВт. Интервал значений ценности 0,45–0,95, полученный таким образом, означает степень важности критерия K2 (квадрант III) по отношению к K1 (квадрант II), ценность которого равна 1. Как видно, степень важности критерия K1 по отношению к K2 будет варьироваться в зависимости от значения ценности по критерию K1, которое в свою очередь варьируется в зависимости от мощности станции 120–125 МВт.

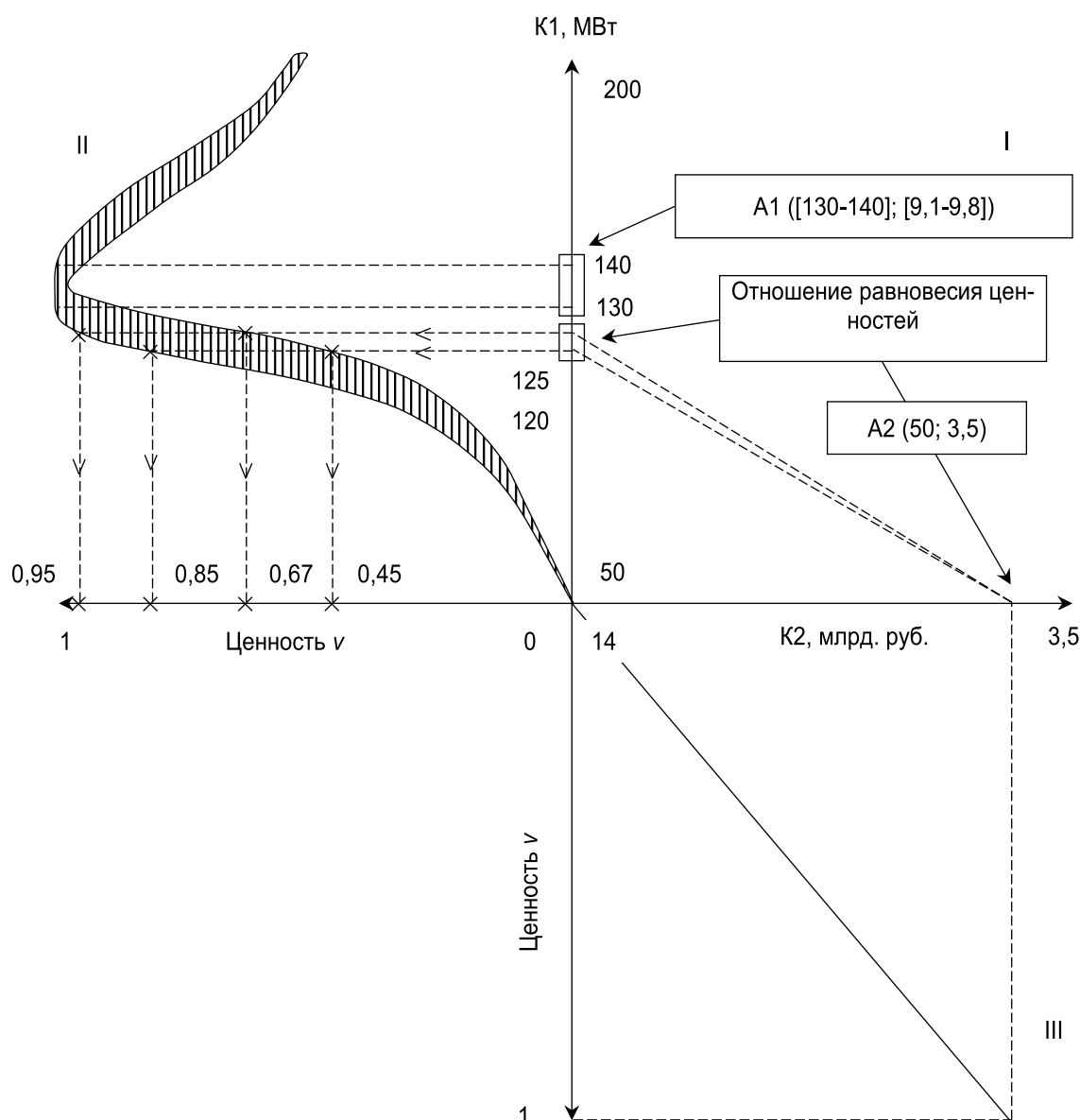


Рис. 4. Определение шкалирующих коэффициентов
 Fig. 4. Determination of scaling factors

Многокритериальная оценка альтернатив второго уровня методом MAUT

После проверки условия взаимной независимости критериев по предпочтению построения однокритериальных функций ценности и определения шкалирующих коэффициентов [10, 11, 14] по формуле (3) определяются МФЦ для каждой АБУ. В случае, когда предпочтения ЛПР задаются в неявном виде, как это было показано ранее, расчет многокритериальных функций ценности проводится для каждого варианта мощности и соответствующей ей ценности

(рис. 4). Так, например, для значения 120 МВт МФЦ будет рассчитана 40 раз (от 0,45 до 0,85 по шкале ценности с шагом 0,01). Шаг при этом можно задавать в зависимости от требуемой точности решения поставленной задачи. Таким образом, МФЦ по имеющимся АБУ будут представлены в виде некоторой области значений в зависимости (рис. 5).

Представленные на рисунке результаты также можно свести в табл. 1.

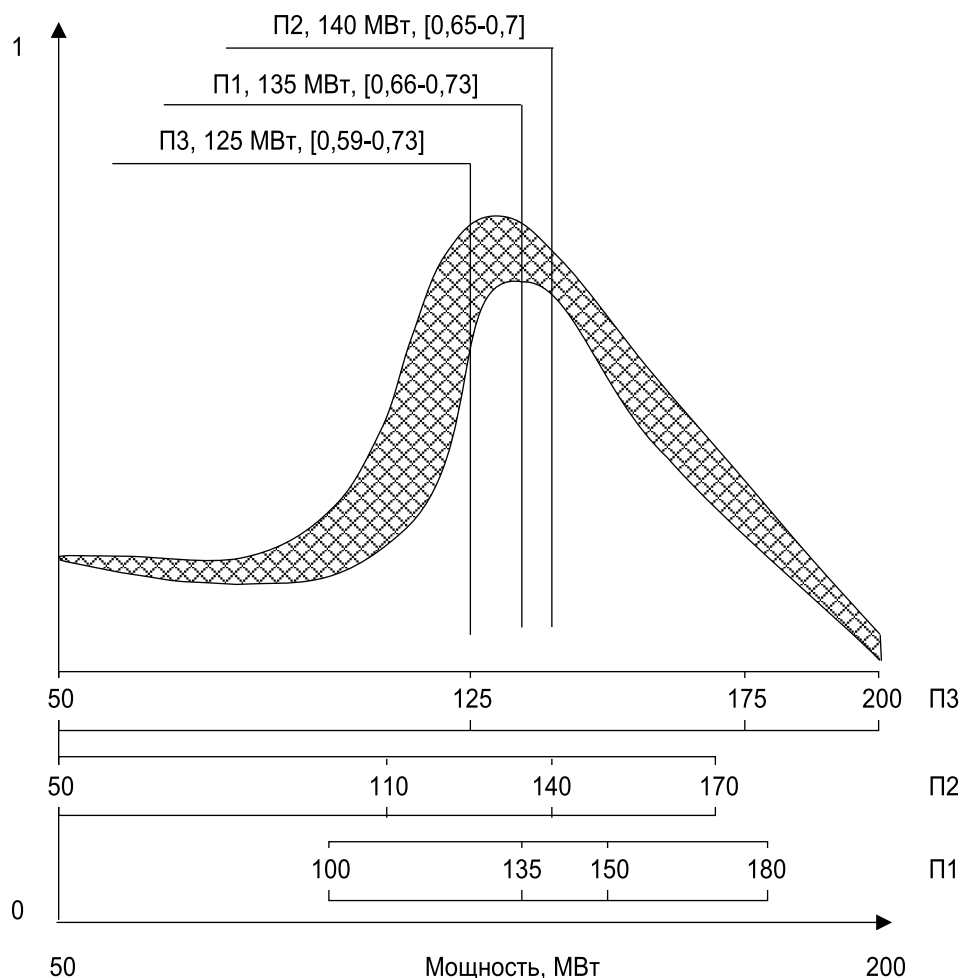


Рис. 5. Зависимость-область значений многокритериальной функции ценности от мощности станции

Fig. 5. Dependence-region of values of the multi-criteria value function vs station capacity

Таблица 1
Многокритериальные оценки ценности для каждого варианта мощности
Table 1
Multi-criteria value estimates for each capacity option

Пункт	Мощность, МВт	Стоимость строительства, млрд. руб.	Ценность
П1	100	7	0,38–0,45
	135	9,45	0,66–0,73
	150	10,5	0,61–0,68
	180	12,6	0,4–0,45
П2	50	3,5	0,41
	110	7,7	0,42–0,56
	140	9,8	0,65–0,7
	170	11,9	0,45–0,53
П3	50	3,5	0,41
	125	8,75	0,59–0,73
	175	12,25	0,43–0,49
	200	14	0,29–0,32

Для наиболее компактного вида в таблице приведено только 4 варианта мощности по каждому пункту, включая получивший максимальную многокритериальную оценку. Ценности лучших вариантов мощности в каждом пункте выделены жирным шрифтом.

Таким образом, в каждом пункте были определены лучшие варианты мощности. Результаты, представленные в табл. 1 и рис. 5, можно интерпретировать следующим образом. Очевидно, что многокритериальные оценки лучших АБУ по каждому пункту сосредоточены вблизи «оптимального» значения мощности (рис. 5). Иная ситуация могла бы сложиться, например, если бы критерий K2 имел больший вес (ввиду

значительной дороговизны строительства): тогда указанные многокритериальные значения сдвинулись бы левее, а область графика со значениями мощности выше «оптимальной» располагалась бы ниже. В этом случае ЛПР было бы склонно выбрать наименьший по мощности вариант строительства ТЭС из имеющихся (в зависимости от стоимости строительства).

Таким образом, после определения лучших АБУ в каждом пункте далее необходима многокритериальная оценка альтернатив первого уровня (АПУ) – пунктов размещения П1-П3 с целью выбрать лучший из них и, таким образом, определиться с местом строительства ТЭС.

Многокритериальная оценка альтернатив первого уровня методом АНР

Согласно методике многокритериального двухуровневого анализа, для этих целей предлагается использовать широко зарекомендовавший себя метод многокритериального анализа АНР, получивший множество приложений к реальным проблемам [15–21].

В соответствии с методом АНР, ЛПР попарно сравнивает имеющиеся альтернативы по критериям (K1-K7), заполняя при этом матрицу парных сравнений (МПС), используя специальную шкалу сравнений (табл. 2).

Таблица 2
Шкала относительных сравнений
Table 2
Scale of relative comparisons

Уровень важности	Количественное значение
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Значительное превосходство	5
Явное превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

Математический аппарат метода АНР предполагает выполнение следующих основных действий.

Определение собственного вектора матрицы $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ может проводиться по известному выражению [15, 16]:

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad (4)$$

где λ_i – элемент собственного вектора матрицы, соответствующий альтернативе или критерию i ; a_{ij} – оценка шкалы парных сравнений альтернатив или критериев i и j ; n – количество альтернатив или критериев.

Вес критерия w_i или альтернативы v_{ij} определяется путем нормирования элементов собственного вектора. Например, вес критерия определяется:

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (5)$$

Оценки альтернатив (с учетом всех критериев) получают по выражению:

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij}, \quad (6)$$

где V_j – показатель качества j -й альтерна-



тивы; w_i – вес i -го критерия; v_{ij} – вес j -й альтернативы по i -му критерию.

По имеющимся критериям ЛПР проводит соответствующие парные сравнения. Сравнение происходит как по важности самих критериев, так и между альтернативами по каждому критерию.

При получении оценок относительной важности между имеющимися АПУ (пунктами) по критериям К1 и К2 использовалась шкала перевода оценок [3–7], при этом, при переводе оценок ценности в оценки относительной важности по крите-

рию К1 использовались средние значения ценности в интервале. Так, например, интервальная оценка ценности пункта П1 0,66–0,73 преобразовывалась в оценку 0,7 и далее это значение переводилось в оценку относительной важности согласно процедуре, приведенной в [3–7].

Матрицы парных сравнений, полученные с учетом мнений экспертов и ЛПР, а также матрица-строка результатов сравнений пунктов представлены табл. 3–11. На рис. 6 также графически представлены результаты сравнений.

Таблица 3

Матрица парных сравнений альтернатив первого уровня по критерию К1

Table 3

Matrix of pairwise comparisons of first-level alternatives by criterion K1

Альтернатива	П1	П2	П3	Вес
П1	1	2,25	3	0,559
П2	0,444	1	1,75	0,271
П3	0,333	0,571	1	0,170

Таблица 4

Матрица парных сравнений альтернатив первого уровня по критерию К2

Table 4

Matrix of pairwise comparisons of first-level alternatives by criterion K2

Альтернатива	П1	П2	П3	Вес
П1	1	2,32	0,272	0,218
П2	0,431	1	0,2	0,112
П3	3,68	5	1	0,67

Таблица 5

Матрица парных сравнений альтернатив первого уровня по критерию К3

Table 5

Matrix of pairwise comparisons of first-level alternatives by criterion K3

Альтернатива	П1	П2	П3	Вес
П1	1	3	0,5	0,309
П2	0,333	1	0,2	0,109
П3	2	5	1	0,582

Таблица 6

Матрица парных сравнений альтернатив первого уровня по критерию К4

Table 6

Matrix of pairwise comparisons of first-level alternatives by criterion K4

Альтернатива	П1	П2	П3	Вес
П1	1	0,2	0,333	0,105
П2	5	1	3	0,637
П3	3	0,333	1	0,258

Таблица 7

Матрица парных сравнений альтернатив первого уровня по критерию K5

Table 7

Matrix of pairwise comparisons of first-level alternatives by criterion K5

Альтернатива	П1	П2	П3	Вес
П1	1	0,333	0,5	0,163
П2	3	1	2	0,540
П3	2	0,5	1	0,297

Таблица 8

Матрица парных сравнений альтернатив первого уровня по критерию K6

Table 8

Matrix of pairwise comparisons of first-level alternatives by criterion K6

Альтернатива	П1	П2	П3	Вес
П1	1	3	0,5	0,309
П2	0,333	1	0,2	0,109
П3	2	5	1	0,582

Таблица 9

Матрица парных сравнений альтернатив первого уровня по критерию K7

Table 9

Matrix of pairwise comparisons of first-level alternatives by criterion K7

Альтернатива	П1	П2	П3	Вес
П1	1	0,333	1	0,200
П2	3	1	3,003	0,600
П3	1	0,333	1	0,200

Таблица 10

Матрица парных сравнений критериев K1-K7

Table 10

Matrix of pairwise comparisons of first-level alternatives by criteria K1-K7

Критерий	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Вес
K1	1	1	3	3	2	1	1	0,204
K2	1	1	2	2	1	1	1	0,165
K3	0,333	0,5	1	0,5	0,333	1	1	0,081
K4	0,333	0,5	2	1	0,5	1	2	0,116
K5	0,5	1	3	2	1	2	3	0,204
K6	1	1	1	1	0,5	1	2	0,135
K7	1	1	1	0,5	0,333	0,5	1	0,095

Таблица 11

Результаты сравнений пунктов строительства тепловых электростанций методом АНР

Table 11

Comparison results of thermal power plants construction sites by the analytic hierarchy process method

Пункт	П1	П2	П3
Оценка	0,281	0,338	0,380

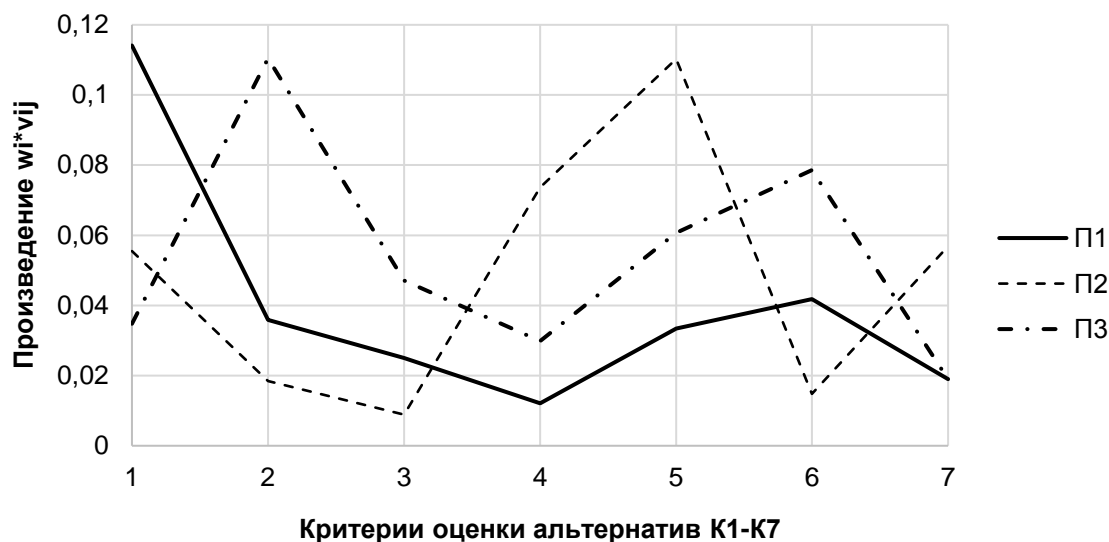


Рис. 6. Распределение весов альтернатив по критериям оценки
Fig. 6. Distribution of alternative weights according to evaluation criteria

Заключение

Таким образом, с учетом предпочтений ЛПР, лучшим для размещения ТЭС был выбран пункт П3. Как видно, несмотря на самую высокую многокритериальную оценку по критерию К1, пункт П1 явился третьим по предпочтительности с учетом всех семи критериев оценки; это является свидетелем того, что основные и наиболее важные факторы оценки альтернатив не всегда определяют принимаемые решения: в данном случае критерий мощности, являясь одним из наиболее важных критериев оценки альтернатив, не определил первенства пункта П1. Принятое решение по наиболее предпочтительному пункту П3 является более сбалансированным; учет факторов в этом решении является наиболее равномерным. Кроме того, данный пункт имеет за-

метное преимущество по критерию стоимости.

В данной статье было показано применение разработанной с участием автора методики многокритериального двухуровневого анализа пунктов размещения электростанций с использованием двух методов многокритериального анализа МАУТ и АНР к тепловым станциям в изолированных районах с децентрализованным электроснабжением. Было показано, таким образом, что разработанная методика может быть также применена в указанных условиях для тепловых станций на предынвестиционной стадии анализа. В настоящей работе методика была применена без учета влияния неопределенности событий, что является целью дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 11.12.2018).
2. Схема территориального планирования Российской Федерации в области энергетики [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420369441> (дата обращения: 06.12.2018).

3. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Многокритериальный двухуровневый подход к выбору лучшей альтернативы в рамках слабоструктурированной проблемы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2013. № 2. С. 118–127.
4. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Поддержка принятия решений на стадии предпроектных исследований на основе двухуровневого многокритериального анализа // Прикладная информатика. 2013. № 6 (48). С.

111–121.

5. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Выбор пункта строительства электростанции в условиях риска методом анализа иерархий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4 (44). С. 141–147.

6. Панкратьев П.С., Шакиров В.А. Двухуровневый многокритериальный анализ пунктов строительства гидроэлектростанции // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 5. С. 385–390.

7. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Методика многокритериального двухуровневого анализа пунктов размещения электростанций // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. № 1. С. 69–83.

8. Баринов В.А. Перспективы развития электроэнергетики России на период до 2030 г. // Кабели и провода. 2010. № 3(322). С. 13–20.

9. Осика Л.К. Управление инвестиционными проектами строительства ТЭС. Прединвестиционная фаза. М.: Вершина, 2009. 344 с.

10. Keeney R. Siting Energy Facilities. Academic Press. New York. 1980. 432 p.

11. Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. Wiley. 1976. 569 p.

12. Winterfeldt D., Fischer G.W. Multiattribute utility theory: Models and assessment procedures // D. Wendt and C. Vlek (Eds.). Utility, probability and human decision

making. Amsterdam: Reidel. 1975. P. 47–85.

13. Белобров В. Анализ динамики стоимости строительства ТЭС в мире // Энергорынок. 2009. № 11(71). С. 64–67.

14. Петровский А.Б. Теория принятия решений. М.: ИЦ «Академия», 2009. 400 с.

15. Saaty T.L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. RWS Publications, Pittsburgh. 1996.

16. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York. 1980.

17. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. Services Sciences. 2008. Vol. 1. No. 1. P. 83–98.

18. Grandzol J.R. Improving the Faculty Selection Process in Higher Education: A Case for the Analytic Hierarchy Process. IR Applications 6. 2005. P. 1–13.

19. Saaty T.L., Vargas L.G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Second Edition. 2012. 343 p.

20. Saaty T.L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. Management Science. 1986. Vol. 32. No. 7. P. 841–855.

21. Tanjim M., Mohammad S.H. An Evidential Reasoning-based Decision Support System to Support House Hunting // International Journal of Computer Applications (0975–8887). 2012. Vol. 57. No. 21. P. 51–58.

References

1. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 g. [Energy strategy of Russia for the period up to 2030]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (available at: 11 December 2018).

2. Skhema territorial'nogo planirovaniya Rossijskoj Federacii v oblasti energetiki [Scheme of territorial planning of the Russian Federation in the field of the energy sector]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420369441> (available at: 6 December 2018).

3. Shakirov V.A., Pankrat'ev P.S. Multi-criteria two level approach to choosing the best alternative within a semi-structured problem. Vestnik Voronejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informacionnye tehnologii [Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies], 2013, no. 2, pp. 118–127. (In Russ.).

4. Shakirov V.A., Pankrat'ev P.S. Decision making support at the pre-feasibility study stage based on two level multi-attribute analysis. Prikladnaya informatika [Journal of Applied Informatics], 2013, no. 6 (48), pp. 111–121. (In Russ.).

5. Shakirov V.A., Pankrat'ev P.S. A choice of the power plant construction site location under conditions of risk with analytic hierarchy process. Sovremennye tehnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2014, no. 4 (44), pp. 141–147. (In Russ.).

6. Pankrat'ev P.S., Shakirov V.A. Two-level multiattribute analysis of hydroelectric station sites. Informacionnye tehnologii [Information Technologies], 2015, vol. 21, no.

5, pp. 385–390. (In Russ.).

7. Shakirov V.A., Pankrat'ev P.S. Technique of multi-attribute two-level analysis of power plant sites. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2017, no. 1, pp. 69–83.

8. Barinov V.A. Development prospects of Russian electric power industry for the period up to 2030. *Kabeli i provoda*, 2010, no. 3 (322), pp. 13–20. (In Russ.).

9. Osika L.K. *Upravleniye investproyektami stroitel'stva TES. Predinvestitsionnaya faza* [Management of TPP construction investment projects. Pre-investment phase]. Moscow: Vershina Publ., 2009, 344 p. (In Russ.).

10. Keeney R. Siting Energy Facilities. Academic Press, New York, 1980, 432 p.

11. Keeney R.L., Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. Wiley, 1976, 569 p.

12. Winterfeldt D., Fischer G.W. Multiattribute utility theory: Models and assessment procedures. D. Wendt and C. Vlek (Eds.). Utility, probability and human decision making. Amsterdam: Reidel, 1975, pp. 47–85.

13. Belobrov V. Analysis of the global dynamics of construction cost of thermal power plants. *Energorynok*, 2009, no. 11(71), pp. 64–67. (In Russ.).

14. Petrovskii A.B. *Teoriya prinyatiya resheniy* [Decision theory]. Moscow: Akademiya Publ., 2009, 400 p. (In Russ.).

15. Saaty T.L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process. RWS Publications, Pittsburgh, 1996.



16. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, 1980.
17. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. Services Sciences, vol. 1, no. 1, 2008, pp. 83–98.
18. Grandzol J.R. Improving the Faculty Selection Process in Higher Education: A Case for the Analytic Hierarchy Process. IR Applications 6, 2005, pp. 1–13.
19. Saaty T.L., Vargas L.G. Models, Methods, Concepts

- & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Second Edition, 2012, 343 p.
20. Saaty T.L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. Management Science, 1986, vol. 32, no. 7, pp. 841–855.
21. Tanjim M., Mohammad S.H. An Evidential Reasoning-based Decision Support System to Support House Hunting // International Journal of Computer Applications (0975–8887), vol. 57, no. 21, no. 2012, pp. 51–58.

Критерии авторства

Панкратьев П.С. обосновал необходимость проведения анализа альтернатив на двух уровнях при решении задачи размещения электростанции; предложил использовать два метода многокритериального анализа альтернатив на каждом уровне; показал возможность задания неточно заданных предпочтений ЛПР и предложил способ учета этих неточностей. Автор получил и оформил научные результаты, несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Pankratiev P.S. has justified the need for the two levels analysis of alternatives when solving the problem of power plant location; proposed to use two methods of multi-attribute analysis of alternatives at each level; demonstrated the possibility of setting imprecisely expressed preferences of decision makers and presented the method of accounting these inaccuracies. The author has received and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Панкратьев Павел Сергеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленной теплоэнергетики,
Братский государственный университет,
665709, ул. Макаренко, 40, г. Братск, Россия;
e-mail: scud33@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel S. Pankratiev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Industrial Heat Power Engineering
of Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia;
e-mail: scud33@inbox.ru



Ключевые проблемы перевода дизельных электростанций на альтернативные виды топлива

© А.Д. Соколов*, С.Ю. Музычук**, Е.Р. Абдулина***

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

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

Резюме: Цель статьи – выявить ключевые проблемы перевода действующих дизельных электростанций на другие, менее затратные по вложениям и более доступные виды топлива. Для обеспечения изолированных удаленных районов Крайнего Севера электроэнергией используются дизельные электростанции, для которых традиционным является дизельное топливо. Его доставляют издалека в эти районы, что требует высоких материальных вложений, цена производимой на нем электроэнергии колеблется от 10 до 20 руб./кВт*ч. В связи с освоением мест добычи полезных ископаемых (таких как нефть и природный газ) в районах Крайнего Севера России целесообразно переводить местные дизельные электростанции на альтернативные виды топлива. В исследованиях использованы официальные статистические данные и методы сравнительного анализа. Дана характеристика современного состояния действующих дизельных электростанций, приведены примеры перевода на альтернативные виды топлива: природный газ, нефть, мазут. Показано, что дизель не является основным топливом для электростанций. Представлены основные проблемы перевода дизельных электростанций на другие виды топлива. Одним из путей реализации энергосберегающей политики предлагается постепенный перевод действующих дизельных электростанций на альтернативные виды топлива (экономически и технически более выгодные в тех или иных условиях) удаленных территорий Крайнего Севера.

Ключевые слова: дизельная электростанция, дизельное топливо, нефть, природный газ, мазут, альтернативные виды топлива

Благодарности: Статья подготовлена при финансовой поддержке Проекта № 0349-2016-0018, № государственной регистрации AAAA-A17-117030310435-0.

Информация о статье: Дата поступления 21 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Соколов А.Д., Абдулина Е.Р. Ключевые проблемы перевода дизельных электростанций на альтернативные виды топлива. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 335–345. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-335-345.

Major problems of diesel power plant switch to alternative types of fuel

Alexandr D. Sokolov, Svetlana Yu. Muzychuk, Elena R. Abdulina

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to reveal the major problems of existing diesel power plant conversion to other types of fuel, which are less costly and more affordable. Diesel power plants traditionally operating on diesel fuel are used to provide electric energy for isolated remote areas of the Far North. Diesel fuel is brought to these areas from afar and is quite expensive, the price of electricity produced by diesel power plants ranges from 10 to 20 rubles/kWh. In connection with the development of oil and natural gas fields in the Far North of Russia, it is advisable to switch local diesel power plants to alternative types of fuels. The study uses official statistics and comparative analysis methods. The current state of the existing diesel power plants is described and the examples of diesel power plant conversion to alternative fuels such as natural gas, oil, fuel oil are given. It is shown that diesel is not the main fuel for power plants. The main problems of diesel power plant switch to other types of fuel are presented. One of the ways to implement the energy-saving policy is the gradual transfer of existing diesel power plants to alternative fuels, which are economically and technically more feasible in certain conditions of the remote territories of the Far North.

Keywords: diesel power station, diesel fuel, oil, natural gas, fuel oil, alternative types of fuel

Information about the article: Received December 21, 2018; accepted for publication March 12, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Abdulina E.R. Major problems of diesel power plant switch to alternative types of fuel. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 335–345. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-335-345.

Введение

Автономные электростанции на разных видах топлива используют в качестве резервного, аварийного или стационарного источника электропитания. Для удаленных районов с небольшим энергопотреблением использование стандартных централизованных источников тепла и электроэнергии крайне затратно из-за большой протяженности линий передач и связанных с этим больших потерь энергии. Более того, потребность в обеспечении их энергией является временной, так как в ряде случаев это вахтовые поселки, месторождения, небольшие сельские населенные пункты (в которых практически нет молодого населения) и т.д. [1–3]. После завершения эксплуатации объектов инфраструктура передачи энергии не будет востребована. Поэтому одной из основных задач для компаний, использующих дизельные электростанции (ДЭС) для выработки электроэнергии является поиск оптимальных вариантов энергоснабжения с использованием альтернативных видов топлива. В первую очередь эта проблема особенно актуальна для отдаленных районов Крайнего Севера, где ДЭС – это единственный источник электроэнергии в связи с отсутствием централизованных сетей. Дизельное топливо само по себе дорогой нефтепродукт и транспортные затраты значительно увеличивают его стоимость для

северных потребителей, где имеются сложности с доставкой (так называемый «северный завоз»).

Расширение разработки месторождений нефти и природного газа в районах Крайнего Севера позволяет рассматривать варианты перевода существующих энергоисточников на альтернативные виды топлива (нефть, мазут, сжиженный природный газ (СПГ), пропан-бутан, газовый конденсат или проведение линий электропередач к изолированным от энергосистемы районам). Как правило, основой для выбора варианта перевода энергоисточника на альтернативное топливо является оценка его стоимости, с учетом возможных маршрутов доставки, наличия ресурсов у производителей, специализированной инфраструктуры для каждого вида топлива. Также при выборе альтернативного топлива учитывают инвестиции на модернизацию, расширение, реконструкцию существующих ДЭС и строительство недостающих коммуникаций, хранилищ и т.д.

В настоящее время большинство изготовителей и поставщиков оборудования ДЭС могут предложить варианты по переводу существующих электростанций на другие виды топлива, при этом коэффициент полезного действия остается на таком же высоком уровне, как и при использовании дизельного топлива [4–8].

Перевод дизельной электростанции на альтернативные виды топлива

По своим техническим характеристикам ДЭС могут быть переведены на другие виды топлива, однако это требует их модернизации и, соответственно, значительных инвестиций.

Перевод действующей ДЭС на природный газ. Природный газ представляет собой смесь различных веществ, но ос-

новная часть природного газа – это метан – от 70 до 98%, также могут входить этан, метан, бутан и другие газы, не являющиеся углеводородами (сероводород, диоксид углерода и др.). Качество и состав природного газа зависят от места добычи.

Преимущества природного газа перед дизельным топливом [9]:



- улучшение экологических показателей (сокращение выбросов в среднем до 20%, в уходящих газах нет вредных примесей или их количество минимально);

- высокая удельная теплота сгорания;

- легкость воспламенения;

- снижение затрат на топливо (минимальные затраты на добычу, транспортировку и подготовку газа к сжиганию);

- минимальная потребность в смазочном масле или ее отсутствие;

- увеличение срока службы оборудования;

- сокращение издержек на обслуживание и ремонт оборудования;

- полное сгорание – не остается золы и шлака.

Среди двигателей внутреннего сгорания, использующих газообразное топливо, можно выделить 3 группы:

1. Дизельные двигатели, переведенные на частичное сжигание газа. Это так называемые двухтопливные дизели (ДД). Количество потребляемого жидкого топлива в них может меняться от 100% до 10–15% в процессе эксплуатации. Остальная часть топлива – природный газ, который смешивается с воздухом на входе в двигатель. При этом воспламенение топливной смеси может происходить либо самостоятельно (от повышения температуры), либо от постороннего источника воспламенения.

2. Газопоршневые двигатели (ГПД), в которых основным топливом является газ, а небольшая доля жидкого топлива (от англ. «pilot fuel» – пилотное топливо) впрыскивается для инициации воспламенения газозооушной смеси либо в цилиндр, либо (значительно чаще) в специальную форкамеру. Воспламенение «pilot fuel» может происходить также двумя способами, упомянутыми выше.

3. Чисто газовые ГПД, работающие только на газовом топливе и не использующие «pilot fuel». Отличаются пониженной степенью сжатия и в большинстве случаев меньшей экономичностью. Источник воспламенения – свеча.

Одной из особенностей ДД является повышенная потребность в смазочном

масле, по сравнению с альтернативными источниками энергии – газовыми и паровыми турбинами, у которых удельный расход смазочного масла на порядок ниже. Проблема смазки для ГПД и ДД превращается не только в техническую, но и в экономическую проблему, т.к. в стоимостном выражении расход масла составляет существенную долю в общих эксплуатационных затратах. Что касается требований к физико-техническим свойствам смазочных масел, то для различных типов ДД эти требования не являются специфическими; выбор типа масла диктуется, главным образом, текущей температурой окружающей среды. Зарубежные фирмы – производители оборудования – подходят к выбору смазочных масел более строго, по сравнению с российскими производителями, и предписывают применение только указанных для каждого конкретного двигателя сортов, что существенно увеличивает стоимость эксплуатации энергетической установки.

При переводе существующей дизельной установки на частичное сжигание газа получим двухтопливный режим, где газ будет являться основным топливом, а дизельное топливо – как запальное для зажигания газозооушной смеси внутри камеры сгорания; аварийное – для работы двигателя при прекращении подачи газообразного топлива; резервное.

После модернизации установка будет способна работать как в двухтопливном (газ и дизельное топливо) режиме, так и в однотопливном режиме (дизельное топливо) без снижения основных параметров. Переход на однотопливный режим может быть произведен в любой момент работы установки без снижения мощностных показателей и сброса нагрузки генератором. Переход на двухтопливный режим также возможен в любой момент при условии, что нагрузка на двигатель составляет не менее 20% от номинальной.

При модернизации необходимо учесть, чтобы характеристики и рабочие параметры двигателя оставались аналогичны оригинальным (построечным), в этом случае ограничения по максимально допусти-

мым параметрам будут соответствовать требованиям завода-изготовителя и не будут превышать параметров для однотопливного режима.

Эксплуатация в двухтопливном режиме происходит в автоматическом режиме электронной системой управления. Данная система является автономной, но при более глубокой модернизации может быть интегрирована в автоматизированную систему управления технологическим процессом электростанции. Процессы по запуску/остановке, синхронизации и ввода/снятия нагрузки осуществляются в однотопливном режиме и не отличаются от процессов до модернизации.

Многоточечная система подачи газа является более безопасной и надежной по отношению к системе подачи газа во впускной коллектор, т.к. турбонагнетатель, охладитель наддувочного воздуха и впускной коллектор не заполнены газом, что соответствует работе в однотопливном режиме. Также данное решение более экологически чистое, т.к. отсутствует выброс газа при промывке цилиндров и переходных процессах.

Величина запального дизельного топлива может составлять не менее 20% и при работе на газе мощность дизельного генератора сократится до 80% от номинальной.

В газообразном виде природный газ транспортируется по газопроводам, что в свою очередь влечет потери природного газа при транспортировке [10, с. 68]. Соответствующее увеличение затрат от потерь должно учитываться при определении перспективного расхода топлива.

Модернизация сохраняет срок службы компонентов установки и график проведения технического обслуживания и капитального ремонта в соответствии с требованиями завода-изготовителя. Для модернизации энергоисточника может быть востребовано различное технологическое оборудование, которое определяется при обосновании конкретного инвестиционного проекта. Инвестиции в модернизацию существующей ДЭС на природный газ будут состоять из затрат на проектно-изыскательские работы, стоимости технологического

оборудования и доставки его к объекту, пуско-наладочные работы, строительство распределительных газопроводов.

Принципиально технология сжигания газа не отличается от технологии сжигания дизельного топлива. Поэтому структура затрат, кроме топливной составляющей, серьезно не изменится. Затраты на оплату труда и условно-постоянные затраты останутся как при сжигании дизельного топлива.

Для облегчения и уменьшения стоимости транспортировки на дальние расстояния природный газ может быть конденсирован в жидкость сжиженного природного газа (СПГ) путем понижения его температуры до -160°C при нормальном атмосферном давлении. Объем природного газа уменьшается при этом в 600 раз [10, с. 174]. При существующем снижении стоимости процессов сжижения, хранения и последующей регазификации СПГ, применение процедуры сжижения делает все более экономически выгодным эксплуатацию газовых месторождений, удаленных от мест потребления [10, с. 164].

При условии перевода действующей ДЭС на СПГ должно быть предусмотрено централизованное хранение топлива, его подготовка (регазификация) и доставка по трубопроводам до энергообъектов, что ведет к увеличению инвестиций на строительство хранилищ СПГ.

Кроме преимуществ существуют и проблемы перевода ДЭС на природный газ, к ним относятся:

- потребность в обучении и переподготовке кадров, работающих на ДЭС;
- необходимость одновременного использования двух видов топлива (природный газ и дизельное топливо, расход которого составляет около 10–15%);
- возможная незначительная потеря мощности;
- необходимость значительных инвестиций при отсутствии газовой инфраструктуры;
- высокая степень пожароопасности топлива;
- увеличение затрат на эксплуатацию при необходимости использования смазочного масла.



Перевод действующей дизельной электростанции на сырую нефть.

Определение понятия «нефть» весьма широко и включает как первичные (неочищенные), так вторичные (очищенные) продукты. Сырая нефть – первичный нефтепродукт, считается наиболее важной нефтяной субстанцией, из которой производятся различные нефтепродукты. Она является сложной смесью жидких углеводородов – химических соединений, содержащих водород и углерод [10, с. 71].

Добываемая сырая нефть представляет собой смесь нефти, воды, твердых загрязнений и растворенных газов (метана, этана, пропана, бутана и пентанов). В первую очередь из смеси нефти и воды удаляют все газы. Если требуется нефть с определенными показателями, которые отличаются от используемой сырой нефти, то необходима очистка нефти и дополнительные инвестиции. На очистных установках из нефти удаляют твердые загрязнения и прочие нежелательные примеси, воду, соли. Сера также может оказаться нежелательной примесью, влияющей на процессы переработки нефти и ее качество, концентрация серы в сырой нефти может варьироваться от 0,05% до 5% и более в некоторых сортах нефти [10, с. 171].

Различные сорта сырой нефти значительно различаются, их характеристики могут меняться в широких пределах. С экономической точки зрения наиболее важными характеристиками нефти являются удельный вес и сернистость, поскольку они определяют цену сырой нефти [10, с. 171].

Так как сырая нефть может быть любой степени качества (в широком диапазоне), то система подачи топлива должна проектироваться для каждого конкретного случая. Для сырой нефти существует много показателей качества, для которых задается предел каждого проекта – это предел для электростанций и индивидуальные пределы для двигателей. Если один или более параметр топлива приближен к предельному значению, такое топливо может оказывать негативное влияние на работу и жизненный цикл комплектующих. Все это вле-

чет дополнительные инвестиции на оборудование системы очистки сырой нефти перед использованием.

Для перевода ДЭС с дизельного топлива на нефть может понадобиться определенное технологическое оборудование, например, модуль подготовки нефти (МПН), емкость суточного запаса нефти, блок переключения топлива, азотная станция, трубопроводы для сырой нефти и др.

МПН необходим для очистки нефти от натрия, от механических примесей и воды, для поддержания температуры и давления нефти на заданных параметрах, для подачи нефти к дизель-генераторной установке (ДГУ).

При модернизации ДЭС, с переводом с дизельного топлива на сырую нефть, необходимо предусматривать хранение сырой нефти или рассматривать существующие резервуары, используемые для дизельного топлива, либо, в случае нехватки, строить новые хранилища. Также необходимо предусмотреть водяные подогреватели в резервуарах для нагрева нефти до необходимой вязкости.

Инвестиции в модернизацию существующей ДЭС на сырую нефть будут состоять из затрат на проектно-изыскательские работы, стоимости оборудования и доставки его к объекту, пуско-наладочные работы. Также будут включать в себя затраты на реконструкцию системы топливных трубопроводов.

Принципиально технология сжигания нефти не отличается от технологии сжигания дизельного топлива. Поэтому структура затрат, кроме топливной составляющей, серьезно не изменится. Увеличатся затраты на обслуживание основного оборудования, насосного оснащения, топливного хозяйства. Для учета этого закладывается рост на 10% фонда оплаты труда с начислениями и рост на 10% условно-постоянных затрат.

При переводе ДЭС на использование нефти возрастут расходы топлива на собственные нужды (разогрев цистерн для слива нефти, разгрузке, подогрев нефти в топливных резервуарах). Также возможны потери небольшого количества нефти при

транспортировке и распределении, т.к. они включают множество операций по перегрузке и хранению. Соответствующее увеличение от затрат на собственные нужды и на потери должно учитываться при определении перспективного расхода топлива.

Ключевые проблемы перевода ДЭС на сырую нефть:

- ограниченные размеры зданий ДЭС приведут к необходимости установки дополнительного оборудования вне здания, что повлечет за собой снижение надежности энергокомплекса;

- двухступенчатая система подогрева нефти приведет к увеличению собственных нужд станции на 5–8%;

- газовая коррозия металлов может привести к частым остановкам энергокомплекса, ведущим к увеличению затрат на эксплуатацию и ремонт;

- выбросы вредных веществ;

- высокая степень пожароопасности топлива;

- увеличение условно-постоянных затраты до 10%;

- увеличение фонда оплаты труда до 10%.

Перевод существующих ДЭС на сырую нефть может быть эффективен за счет снижения топливной составляющей в текущих затратах.

Перевод действующей дизельной электростанции на мазут. Мазут представляет собой смесь углеводородов, нефтяных смол, асфальтенов, карбенов, карбоидов и органических соединений [11]. Мазут – продукт вторичной переработки нефти – включает все виды топочного и флотского (котельного) мазутов, в том числе полученных компаундированием. Кинематическая вязкость превышает $1 \cdot 10^{-5}$ м²/с при 80°C. Температура вспышки всегда выше 50°C, а плотность превышает 0,9 кг/дм³ [10, с. 187].

Мазут является одним из самых дешевых видов нефтепродуктов. Его цена у производителей зачастую ниже цены нефти, из которой его получают. Однако необходимо отметить, что по качеству и энергетической ценности мазут уступает и

нефти, и дизельному топливу – ниже калорийность, более высокое содержание серы и парафинов. Ключевая проблема его использования – высокая температура застывания, что требует для его транспортировки обогреваемых автоцистерн и обогреваемых речных танкеров, а также утепленных с подогревом резервуаров для хранения.

Мазут используется в энергоустановках для производства электроэнергии и тепла. Объемы потребления мазута для выработки электроэнергии за последние 30 лет значительно снизились в связи с ужесточением экологических требований [10, с. 173].

Для того чтобы технологическое оборудование стационарной электростанции находилось в рабочем состоянии и можно было максимально снизить его износ, необходимо использовать высококачественное топливо. При использовании мазута образуется зола, которая увеличивает скорость коррозии оборудования, забивает форсунки, требует периодической остановки для чистки оборудования электростанций. Кроме того, входящая в состав мазута сера и ее соединения увеличивают скорость коррозии оборудования. Такое топливо сокращает практически в два раза интервалы между техническим обслуживанием и продолжительностью срока службы деталей.

В связи с этим, при переводе действующих станций на мазут необходимо соблюдать те параметры качества топлива, которые рекомендует производитель технологического оборудования. Эти рекомендованные значения представляют собой пределы для электростанций и индивидуальные пределы для двигателей. Если какой-либо параметр мазута приближен к предельному значению, то это может оказать негативное влияние на работу и жизненный цикл технологического оборудования.

Топливо не должно содержать примесей или химических отходов, так как это подвергает опасности используемое оборудование, а также негативно сказывается на производительности двигателя, более того, это может причинить вред персоналу или увеличить количество вредных выбросов в атмосферу, и повлечет дополнительные за-



траты на его очистку перед использованием.

Сам вариант перевода ДЭС на использование мазута по всем основным решениям аналогичен варианту перевода на нефть. Различие заключается в увеличении собственных нужд теплоисточников, так как температура разогрева и хранения мазута более высокая, чем у нефти. Также возрастут условно-постоянные расходы, связанные с обслуживанием оборудования.

Для обеспечения работы дизель-генераторной установки на мазуте необходимо модернизировать существующую установку, для этого может потребоваться дополнительное оборудование и его монтаж, а также техобслуживание действующего оборудования. На существующих ДГУ необходимо сделать техническое обслуживание и дополнительно смонтировать теплоизоляцию, обогрев топливных трасс, защитных экранов, осуществить монтаж трубопроводов и дистанционно управляемых клапанов подачи и возврата топлива для перехода на тяжелое или дизельное топливо и обратно, монтаж системы охлаждения топливной аппаратуры, также установить гаситель импульсов давления топлива и дополнительный циркуляционный топливный насос, а также приобрести станцию топливоподготовки, сепарационные модули для очистки мазута, сепарационные модули для очистки смазочного масла.

На месте слива мазута из автоцистерн покрытие территории площадки должно быть выполнено из материалов, обеспечивающих максимально эффективный сбор проливов мазута специальными средствами и защиту почв и подпочвенных

грунтовых вод от загрязнения мазутом. Для сбора разлитого мазута на территории ДЭС должен быть предусмотрен запас сорбента в количестве, достаточном для ликвидации последствий максимально возможного пролива мазута.

Инвестиции в модернизацию существующей ДЭС на мазут будут состоять из затрат на проектно-изыскательские работы, стоимости оборудования и доставки его к объекту, пуско-наладочные работы, и дополнительно будут включать в себя замену горелок, организацию приема и хранения топлива, реконструкцию системы топливных трубопроводов.

Принципиально технология сжигания мазута не отличается от технологии сжигания дизельного топлива. Поэтому структура затрат, кроме топливной составляющей, серьезно не изменится. Увеличатся затраты на обслуживание основного оборудования, насосного оснащения, топливного хозяйства. Для учета этого необходимо закладывать рост на 15% фонда оплаты труда с начислениями и рост на 20% условно-постоянных затрат.

При переводе ДЭС на использование мазута возрастут расходы тепловой энергии и топлива на собственные нужды (подогрев мазута при хранении, подогрев топлива в емкостях и перед подачей). Соответствующее увеличение должно учитываться при определении перспективного расхода топлива.

Перевод существующих ДЭС на мазут (при всех минусах) может быть экономически эффективен за счет снижения топливной составляющей в текущих затратах.

Оценка эффективности перевода существующих дизельных электростанций на альтернативные виды топлива

Для оценки эффективности перевода существующих ДЭС на альтернативные виды топлива используются принятые в

Российской Федерации «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов»¹, что обязательно с

¹Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ от 21.06.1999 № ВК 477 / Methodical recommendations for investment project effectiveness estimation. Approved by the Ministry of Economics of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation, State Committee for Construction of the Russian Federation of 21 June 1999. No. VK 477.

учетом специфики отрасли и внутренних методик определения эффективности инвестирования, принятых в этих отраслях.

Под инвестиционным проектом понимается план вложений экономических, производственных и прочих ресурсов с целью получения доходов [12], а также для решения иных задач, к примеру, инфраструктурных, как в случае с переводом ДЭС на другие виды топлива.

Для определения эффективности реализации проектов по переводу ДЭС на альтернативные виды топлива можно применить систему показателей [13, 14]:

- чистый дисконтированный доход NPV;
- срок окупаемости инвестиций;
- внутренняя норма доходности IRR;
- высвобождение оборотного капитала от разницы использования между базовым и альтернативным видами топлива;
- состояние текущего счета на конец расчетного периода.

Для выбора более подходящего варианта все виды топлива сравнивают с существующим (базовым вариантом) – дизельным топливом.

Для сравнения проектов по базовому варианту и варианту перевода ДЭС на альтернативное топливо необходимо определить размеры инвестиций и текущие расходы для каждого варианта.

Текущие расходы включают в себя затраты на используемое топливо и энер-

гию, амортизационные отчисления и прочие эксплуатационные расходы, в том числе: оплата труда, отчисления на социальные нужды и обязательное страхование, общепроизводственные расходы (без амортизации), плата за загрязнение окружающей среды, непредвиденные расходы.

Для определения влияния на проект тех или иных факторов может быть проведен анализ чувствительности, который определяет уровень влияния расчетных показателей инвестиционного проекта на достигнутые результаты. С помощью такого анализа определяют критические границы изменения расчетных показателей проекта, в частности – как повлияет рост стоимости топлива на эффективность проекта. При этом, чем выше диапазон расчетных показателей, в котором показатель эффективности проекта находится в пределах приемлемых значений, тем выше уровень прочности инвестиционного проекта и ниже влияние на него различных внешних факторов: увеличение цены топлива, увеличение стоимости оборудования для модернизации и переоснащения ДЭС и т.д.

Характеристикой эффективности того или иного проекта может стать себестоимость электроэнергии, производимой на ДЭС при использовании альтернативного вида топлива. В таблице приведен пример расчета перевода ДЭС на нефть, мазут и газ (сетевой и СПГ).

Перевод дизельной электростанции на альтернативные виды топлива (условный пример)
Diesel power plant switch to alternative types of fuel (a tentative example)

Показатели	Базовый вариант	Нефть	Мазут	Газ	
				Сетевой	СПГ
Себестоимость электроэнергии, руб./кВт·ч	15	11	13	10	12
Чистая приведенная стоимость (NPV), млн руб.		350	80	420	260
Внутренняя норма доходности (IRR), %		80	24	90	61
Индекс прибыльности		6,5	1,1	6,9	4,4
Срок окупаемости простой, год		2,3	5,2	2,1	2,7
Дисконтированный срок окупаемости, год		2,5	6,9	2,3	3,0
Капитальные вложения, млн руб.		70	80	60	60

Примечание. Источник – расчеты авторов.



В соответствии с выполненными расчетами, наиболее эффективным при прочих равных условиях (по совокупности показате-

лей) является перевод ДЭС на сетевой газ, а наименее эффективным – перевод на мазут.

Заключение

В последнее время удорожание дизельного топлива повлекло необходимость перевода действующих ДЭС на альтернативные, более дешевые виды топлива.

При рассмотрении вариантов перевода действующих ДЭС на такие виды топлива как природный газ, СПГ, нефть и мазут можно выделить основные проблемы перевода:

- потребуется обучение и переподготовка кадров, работающих на ДЭС;
- необходимы значительные инвестиции в модернизацию действующего оборудования и инфраструктуры ДЭС;
- высокая пожароопасность используемого топлива;
- увеличение затрат на эксплуатацию и ремонты оборудования ДЭС;
- при использовании жидкого топлива (нефть, мазут) увеличиваются затраты на собственные нужды для подогрева выбранного вида топлива; потребуется дополнительное оснащение специальными системами очистки и топливоподготовки.

Преимущество перевода на альтернативный вид топлива действующих ДЭС – это значительное снижение затрат на топливо и возможность использования освобожденного оборотного капитала для дальнейшей модернизации ДЭС или реализации

выбранного проекта.

Технически более простым из предложенных вариантов перевода ДЭС на альтернативные виды топлива является перевод на природный газ. В этом варианте требуется меньше инвестиций в модернизацию, не требуются дополнительная очистка топлива, дополнительные затраты тепла на собственные нужды, сокращаются издержки на эксплуатацию и ремонт оборудования ДЭС, также использование этого вида топлива ведет к улучшению экологических показателей по сравнению с дизельным топливом, сырой нефтью и мазутом.

Варианты перевода ДЭС на сырую нефть и мазут более сложны в техническом исполнении, требуют дополнительного оборудования и предъявляют повышенные требования к качеству используемого топлива, что влечет за собой рост инвестиций на модернизацию и увеличение затрат на эксплуатацию ДЭС.

Таким образом, для выбора оптимального варианта перевода ДЭС на альтернативные виды топлива необходимо применять методику сравнительной эффективности, основанную на разнице денежных потоков базового и альтернативного вариантов.

Библиографический список

1. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Попов С.П., Петров Н.А. Малая энергетика Севера: проблемы и пути развития. Новосибирск: Наука, 2002. 188 с.
2. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Попов С.П. Развитие малой энергетики на северо-востоке России: проблемы, эффективность, приоритеты // Малая энергетика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 21–24 ноября 2006 г.). Москва, 2006. 370 с.
3. Беляев Л.С., Лагерева А.В., Посекалин В.В. Энергетика XXI века: условия развития, технологии, прогнозы. Новосибирск: Наука, 2004. 386 с.
4. Залманов Л.Р., Крышина Т.М. Перевод дизельных электростанций на газ [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Энергетик». 2014. № 1.

- URL: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/10> (дата обращения 14.12.2018).
5. Мамедова М.Д. Работа дизеля на сжиженном газе. М.: Машиностроение, 1980. 149 с.
 6. Столяров С.П. Использование нефти в качестве топлива для дизель-генераторов, работающих в условиях нефтепромыслов / С.П. Столяров, В.В. Гаврилов, В.Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 4. С. 783–792. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-783-792.
 7. Wärtsilä – мировой лидер в технологии нефтяных дизель-генераторов [Электронный ресурс]. URL:

https://www.wartsila.com/docs/default-source/local-files/russia/power-plants/станции-на-сырой-нефти.pdf?sfvrsn=a3f86444_2 (дата обращения: 14.12.2018).
8. Капралов Д. А. Мини-ТЭС на сырой нефти в Красноярском крае [Электронный ресурс] // Специализированный информационно-технический журнал «Турбины и дизели». 2009. Январь-февраль. С. 2–5. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/373> (дата обращения: 09.11.2018).
9. Курс «Основы современной энергетики» [Электронный ресурс] // Корпоративный университет «ЕвроСибЭнерго». URL: <https://university.ie.corp/> (дата обращения: 26.11.2018).
10. Руководство по энергетической статистике. Франция: Международное энергетическое агентство, Организация экономического сотрудничества и развития при содействии Статистического бюро Европей-

ских сообществ (Евростат), 2007, 192 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/metod/ManualRussian_web.pdf (дата обращения: 26.11.2018).
11. Липантьев Р.Е., Турбалина В.П. Влияние элементного состава нефти различных месторождений на эксплуатационные свойства мазута // Научно-технический и производственный журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 9-10. С. 52–56.
12. Корчагин Ю.А. Инвестиции и инвестиционный процесс [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lerc.ru/?part=articles&art=4&page=24> (дата обращения: 09.11.2018).
13. Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Агафонов Г.В. Методы и модели разработки региональных энергетических программ. Новосибирск: Наука, 2003. 140 с.
14. Санеева Б.Г. Региональные энергетические программы. Новосибирск: Наука, 1995. 246 с.

References

1. Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Popov S.P., Petrov N.A. *Malaya energetika Severa: problemy i puti razvitiya* [Small-scale power generation of the North: problems and development directions]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2002, 188 p. (In Russ.).
2. Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Popov S.P. *Razvitie maloj energetiki na severo-vostoke Rossii: problemy, effektivnost', priority* [Development of small-scale power generation in the north-east of Russia: problems, efficiency, priorities]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Malaya energetika"* [Proceedings of International scientific and practical conference "Small-scale power generation", Moscow, 21–24 November 2006]. Moscow, 2006, 370 p. (In Russ.).
3. Belyaev L.S., Lagerev A.V., Posekalin V.V. *Energetika XXI veka: usloviya razvitiya, tekhnologii, prognozy* [Energy sector of the XXI century: development conditions, technologies, forecasts]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2004, 386 p. (In Russ.).
4. Zalmanov L.R., Kryshina T.M. *Perevod dizel'nykh elektrostancij na gaz* [Diesel power plant conversion to gas] // Internet-journal Energetik. 2014. No. 1. URL: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/10> (available at: 14 December 2018).
5. Mamedova M.D. *Rabota dizelya na szhizhennoy gaze* [Liquefied gas-fired diesel]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980, 149 p. (In Russ.).
6. Stolyarov S.P., Gavrilov V.V., Mashchenko V.Yu. The use of fuel oil for diesel-generator working in oil fields. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.4 (2018): Pp. 783–792. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-783-792.
7. Wärtsilä – mirovoj lider v tekhnologii neftnykh dizel'-generatorov [Wärtsilä – a world leader in the technology of petroleum diesel generators]. URL: https://www.wartsila.com/docs/default-source/local-files/russia/power-plants/stancii-na-syroj-nefti.pdf?sfvrsn=a3f86444_2

(available at: 14 December 2018).
8. Kapralov D.A. *Mini-TES na syroj nefi v Krasnoyarskom krae* [Crude oil-fired mini-power plants in the Krasnoyarsk Territory] // Specializirovannyj informacionno-tekhnicheskij zhurnal «Turbiny i dizeli» [Specialized information and technical publications "Turbines and Diesels"]. 2009. January- February, pp. 2–5. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/373> (available at: 9 November 2018).
9. *Kurs "Osnovy sovremennoj energetiki"* [Course on Fundamentals of Modern Power Engineering] // Korporativnyj universitet «EuroSibEnergo» [Corporate University EuroSibEnergo]. URL: <https://university.ie.corp/> (available at: 26 November 2018).
10. *Rukovodstvo po energeticheskoy statistike. Franciya: Mezhdunarodnoe energo-ticheskoe agentstvo, Organizatsiya ekonomicheskogo sotrudnichestva i razvitiya pri sodejstvii Statisticheskogo byuro Evropejskih soobshchestv (Eurostat)* [Guidance on energy sector statistics. France: International Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development with the assistance of the Statistical Office of the European Communities (Eurostat)]. URL: http://www.gks.ru/metod/ManualRussian_web.pdf (available at: 26 November 2018).
11. Lipantiev R.E., Tutubalina V.P. *Vliyaniye elementnogo sostava nefi razlichnykh mestorozhdeniy na ekspluatatsionnyye svoystva mazuta* [The influence of the elemental composition of oil from various fields on the performance properties of fuel oil]. Scientific, technical and production journal of higher education institutions. *Energyproblems*. 2012. No. 9–10. Pp. 52–56 (In Russ.).
12. Korchagin Yu.A. *Investicii i investicionnyj process* [Investments and an investment process]. URL: <http://www.lerc.ru/?part=articles&art=4&page=24> (available at: 9 November 2018).
13. Saneev B.G., Sokolov A.D., Agafonov G.V. *Metody i modeli razrabotki regional'nykh energeticheskikh pro-*



gramm programm [Methods and models for regional energy program development]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2003, 140 p. (In Russ.).

14. Saneeva B.G. *Regional'nye energeticheskie programmy* [Regional energy programs]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1995, 246 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Соколов А.Д., Музычук С.Ю., Абдулина Е.Р. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Abdulina E.R. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Александр Даниилович,

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: sokolov@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander D. Sokolov,

Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher at the Melentiev Energy
Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: sokolov@isem.irk.ru

Музычук Светлана Юрьевна,

кандидат экономических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: muz@isem.irk.ru

Svetlana Yu. Muzychuk,

Cand. Sci. (Economics),
Leading Researcher at the Melentiev Energy
Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: muz@isem.irk.ru

Абдулина Елена Равильевна,

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

Elena R. Abdulina,

Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia;
e-mail: abdulinaelena@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.423.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-346-355>

Совершенствование силовой цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

© В.С. Томилов, И.А. Баринов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данной статьи является исследование типовой силовой электрической цепи электровоза переменного тока серии «Ермак», работающего в режиме рекуперативного торможения, с выявлением ее недостатков. Для устранения недостатков разработана и предложена усовершенствованная силовая схема с заменой типового выпрямительно-инверторного преобразователя на современный, выполненный на базе IGBT-транзисторов, а также предложено исключить блоки балластных резисторов из якорной цепи тяговых электродвигателей. Применено математическое моделирование штатной системы рекуперативного торможения электровоза переменного тока. В ходе математического моделирования были получены кривые тока и напряжения контактной сети, тока генератора, напряжения инвертора и значение коэффициента мощности. Был предложен способ реализации рекуперативного торможения без применения блоков балластных резисторов. В результате анализа электромагнитных процессов работы штатной силовой схемы электровоза переменного тока в режиме рекуперации выявлен ряд недостатков, оказывающих негативное воздействие на эффективность рекуперативного торможения; предложено техническое решение по усовершенствованию его силовой электрической цепи, позволяющее значительно повысить энергоэффективность данного режима работы электровоза.

Ключевые слова: электровоз, рекуперативное торможение, выпрямительно-инверторный преобразователь, блок балластных резисторов, коэффициент мощности

Информация о статье: Дата поступления 2 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 21 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Томилов В.С., Баринов И.А., Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О. Совершенствование силовой цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 346–355. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-346-355.

Improvement of AC locomotive power circuit in regenerative braking mode

V.S. Tomilov, I.A. Barinov, O.V. Melnichenko, S.G. Shramko, A.O. Linkov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract: The article presents a standard electric power circuit of an AC locomotive of Ermak series operating in the mode of regenerative braking and reveals the circuit's drawbacks. To eliminate them, it is proposed to use an improved power circuit where standard reversible converter is replaced with a more advanced IGBT-based counterpart and exclude ballast resistor blocks from the armature circuits of traction motors. A mathematical modeling of a standard system of AC locomotive regenerative braking is performed. The conducted mathematical modeling allowed to obtain the curves of the catenary current and voltage, generator current, inverter voltage and power factor. A method of regenerative braking without the application of ballast resistor blocks is proposed. Having analyzed the electromagnetic processes of AC locomotive standard power circuit operation in the regenerative braking mode, the authors have revealed a number of drawbacks that have an adverse effect on the efficiency of regenerative braking. A technical solution for improving the AC locomotive power circuit is introduced that enables a substantial increase of the locomotive energy performance in this operation mode.

Keywords: electric locomotive, regenerative braking, reversible power converter, ballast resistor block, power factor

Information about the article: Received February 2, 2019; accepted for publication March 21, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Tomilov V.S., Barinov I.A., Melnichenko O.V., Shramko S.G., Linkov A.O. Improvement of the AC locomotive power circuit in a regenerative braking mode. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 346–355. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-346-355.

Введение

В России на электровозах постоянного тока рекуперативное торможение применяется с 1930-х годов. С выпуском электровозов ВЛ60Р в 1960-х годах началось внедрение рекуперации на электровозах переменного тока. В дальнейшем система рекуперативного торможения развивалась с поступлением в серийное производство электровозов ВЛ80Р в 1970-х годах, ВЛ85 – в 1983 г., ВЛ65 – в 1992 г.; совершенствуется она и по сей день с производством современных отечественных электровозов переменного тока серий ЭП1, Э5К и 2(3, 4)ЭС5К.

Преимущество рекуперативного торможения перед другими видами электрического торможения состоит в значительной (до 20%) экономии электрической энергии, возвращаемой тормозящим электровозом в контактную сеть, в повышении безопасности движения тяжелых грузовых поездов на участках со сложным профилем пути. Жесткие тормозные характеристики электровоза при рекуперативном торможении позволяют поддерживать неизменной скорость движения на затяжных спусках, что повышает техническую скорость поезда и, соответственно, пропускную способность участка железной дороги.

На сегодняшний день на железных дорогах, электрифицированных однофазным переменным током, работают электровозы с коллекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД) и выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) на базе тиристорov. В связи с применением тиристорov в тяговых преобразователях, существует ряд факторов, ограничивающих эффективность применения рекуперативного торможения. Особенности коммутации тиристорov приводят к значительным искажениям синусоидальной формы напряжения в контактной сети и первичной обмотке тягового трансформатора электровоза, что в свою очередь оказывает негативное влияние как на эксплуатационные характеристики самого электровоза, так и на систему тягового энергоснабжения в целом.

В работах [1, 2] приведены основные

проблемы применения рекуперации на отечественных электровозах переменного тока – прежде всего это низкие значения коэффициента мощности электровоза и коэффициента полезного действия инвертора, а также низкое качество электроэнергии, возвращаемой в контактную сеть. Исследование проблемы низкой эффективности рекуперации показало, что основной причиной тому служит принятый алгоритм управления инвертором, подразумевающий поочередную коммутацию плеч тиристорov ВИП и наличие значительного угла запаса δ . Данные особенности алгоритма управления ВИП обуславливают потребление электровозом реактивной мощности из сети [3], в результате чего коэффициент мощности современных отечественных электровозов переменного тока, например, электровоза серии «Ермак», в режиме рекуперативного торможения не превышает значения 0,65.

Есть еще одна особенность силовой цепи электровоза, без которой реализовать рекуперативное торможение невозможно – это наличие блоков балластных резисторов (ББР). Связано это с тем, что принятая система управления тиристорным ВИП вынуждает ввод дополнительного активного сопротивления в якорную цепь ТЭД – это необходимо для обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения. Ввиду падения напряжения на балластных резисторах происходит недоиспользование мощности генераторов и, как следствие, снижение отдаваемой электровозом в контактную сеть электроэнергии.

Исследование организации работы тиристорного ВИП в инверторном режиме по законам управления $\beta = const$ (постоянство угла опережения открытия) и $\delta = const$ (постоянство угла запаса) представлено в работе [4, 5]. Вариант работы с $\beta = const$ обладает устойчивой внешней характеристикой инвертора, благодаря чему система рекуперативного торможения может работать без блоков балластных резисторов в силовой цепи электровоза, однако из-за значительной величины угла β этот вариант усту-



пает второму по основному энергетическому показателю – коэффициенту мощности. В случае же $\delta = const$ для придания внешней характеристике инвертора электрической устойчивости требуется введение в якорную цепь ТЭД балластных резисторов. Как показали исследования, паде-

ние напряжения на балластных резисторах, а также расход электрической энергии на работу вентиляторов охлаждения добавочного сопротивления приводят к снижению коэффициента мощности в режиме рекуперации более чем на 10%.

Постановка задачи

1. В математической модели «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» получить кривые электромагнитных процессов электровоза переменного тока, работающего в режиме рекуперативного торможения при штатной системе.

2. Выявить основные недостатки работы штатной системы рекуперативного торможения, влияющие на снижение воз-

врата электроэнергии электровозом в контактную сеть.

3. На основании выявленных недостатков предложить техническое решение по их устранению, в частности модернизацию силовой цепи электровоза, работающего в режиме рекуперативного торможения, и способ реализации ресурсосберегающего режима без применения блоков балластных резисторов.

Анализ электромагнитных процессов при работе тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя

Для исследования электромагнитных процессов в системе «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» был использован программный пакет MatLab. Для моделирования электрической схемы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения использовалась интерактивная среда имитационного моделирования Simulink. За основу силовой схемы математической модели была принята силовая электрическая цепь одной секции электровоза 2ЭС5К, работающего в режиме рекуперации.

При рекуперативном торможении ТЭД электровоза работают в качестве генераторов с независимым возбуждением. Обмотки возбуждения электродвигателей соединены последовательно и получают питание от выпрямительной установки возбуждения (ВУВ). По результатам математического моделирования электромагнитных процессов были получены кривые токов сети i_1 и генератора i_d , кривые напряжений сети u_1 и преобразователя u_d , отраженные

на рис. 1. В штатной силовой схеме в качестве инвертора используется тиристорный ВИП, который управляется с постоянным углом запаса открытия плеч $\delta = const$.

Основные причины снижения коэффициента мощности электровоза с типовыми ВИП в режиме рекуперативного торможения следующие:

- значительная величина угла сдвига фаз φ между током и напряжением в цепи первичной обмотки тягового трансформатора, что свидетельствует о высоком потреблении электровозом реактивной мощности, и, как следствие низкий коэффициент мощности;

- коммутация токов плеч инвертора осуществляется в конце каждого полупериода с опережением открытия тиристорov на угол β ;

- угол сдвига фаз напрямую зависит от величины угла β , следовательно, значение данного угла влияет на энергетические показатели инвертирования энергии в сеть.

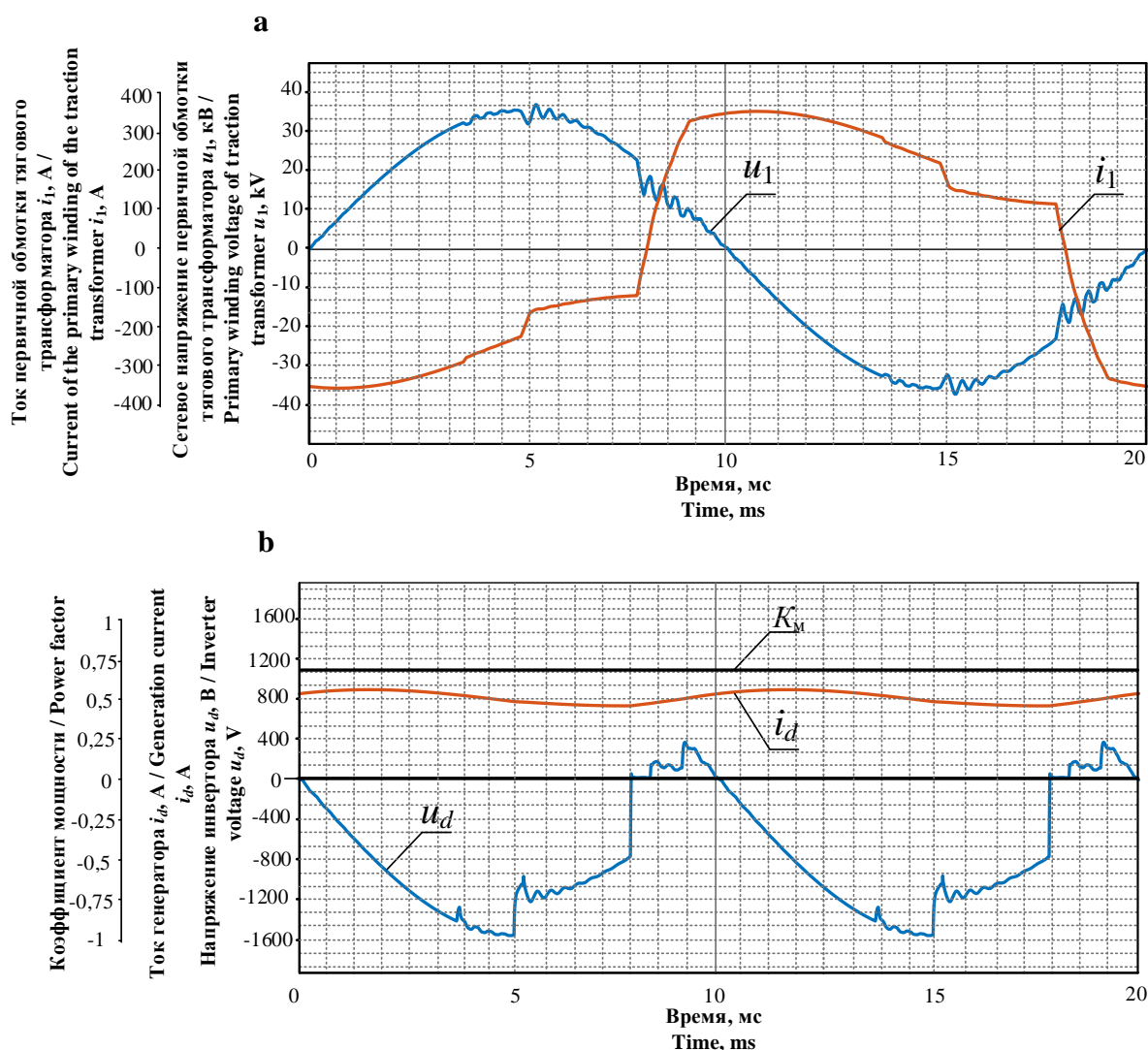


Рис. 1. Диаграммы электромагнитных процессов типового ВИП в режиме рекуперативного торможения на третьей зоне регулирования напряжения при $\alpha_p = 90$ эл. градусов: а – кривые тока i_1 и напряжения u_1 тяговой сети; б – кривые тока генератора i_d , напряжения преобразователя u_d и величина коэффициента мощности K_m

Fig. 1. Electric diagrams of a standard reversible power converter in the mode of regenerative braking on the third voltage regulation region when $\alpha_p = 90$ electrical degrees: а – catenary current i_1 and voltage u_1 curves; б – curves of current generator i_d , converter voltage u_d and power factor K_m

Анализ электромагнитных процессов при работе выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов

Исходя из перечисленных недостатков ВИП, на тиристорной базе целесообразным представляется использование тягового преобразователя на современных, полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах, в качестве которых на электроподвижном составе переменного тока могут выступать IGBT-транзисторы, выполненные по технологии Press-Pack [6–11]. IGBT-транзисторы такого устройства прием-

лемы для установки как на существующих, так и на новых отечественных электровозах переменного тока. С целью минимизации изменений силовой цепи и цепей управления при использовании транзисторного преобразователя предлагается применять такое же четырехзонное регулирование выпрямленного напряжения, как и в типовом ВИП.



Помимо этого, в новом преобразователе заложен принцип индивидуального регулирования напряжения на ТЭД электровоза. Схема выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах имеет восемь плеч аналогично типовому, а также одно дополнительное диодно-транзисторное плечо параллельно цепи выпрямленного тока.

Во время отдачи электровозом электрической энергии в контактную сеть одновременно происходит потребление части энергии через выпрямительные установки возбуждения для независимого питания обмоток возбуждения тяговых электродвигателей. Поэтому процесс выпрямления напряжения и недостатки типовой схемы ВУВ также оказывают негативное влияние на коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения.

Анализ основных направлений развития ВУВ тяговых электродвигателей электровозов переменного тока выполнен в работе [12]. Силовая схема ВУВ, выполненная на базе тиристоров, не изменялась с момента начала выпуска электровозов серии ВЛ80Т (1967 г.). В связи с этим в модернизированной силовой цепи электровоза переменного тока дополнительно предлагается использовать выпрямительную установку возбуждения, также выполненную на базе полностью управляемых IGBT-транзисторов [13]. Данное техническое решение было применено и исследовано в условиях реального электровоза ВЛ80Р № 1829, который успешно работает с ВУВ на IGBT-транзисторах с 2014 г. по настоящее время; техническое решение доказало свою эффективность, увеличив коэффициент мощности локомотива на 4% и уменьшив коэффициент относительной пульсации тока возбуждения на 67%.

Упрощенная модернизированная силовая схема электровоза в режиме рекуперативного торможения из расчета на один тяговый электродвигатель представлена на рис. 2.

Конструкция преобразователя на IGBT-транзисторах предусматривает индивидуальное регулирование напряжения на

каждом тяговом двигателе, что может обеспечить лучшее выравнивание токов ТЭД. Исключение блоков балластных резисторов из якорной цепи электровоза в режиме рекуперативного торможения позволяет эффективнее использовать мощность генераторов, ведь падение напряжения на балластных резисторах, например, на 4-й зоне регулирования составляет порядка 150 В, а это сужает область реальных тормозных характеристик электровоза до середины 4-й зоны регулирования напряжения преобразователя.

Внешняя характеристика генератора без добавочного активного сопротивления имеет прямолинейный характер, и для обеспечения статической устойчивости рекуперативного торможения без использования балластных резисторов необходимо, чтобы внешняя характеристика инвертора имела положительный наклон.

Инвертор на базе IGBT-транзисторов управляется по закону $W_{wreg} = var$, где $W_{wreg} = \gamma_D + W_D$, рис. 3.

Обеспечить такой наклон возможно только в случае, когда при увеличении тока генератора i_d увеличивается напряжение инвертора U_u . Разработанный авторами закон управления позволяет это реализовать следующим образом: в точке холостого хода искусственно увеличивается рабочая зона разрядного диодно-транзисторного плеча W_{wreg} , включенного параллельно цепи выпрямленного тока, для того чтобы средняя величина напряжения инвертора U_u была немного меньше напряжения при номинальной нагрузке. По мере увеличения тока генератора i_d величина рабочей зоны разрядного диодно-транзисторного плеча W_{wreg} уменьшается, что приводит к увеличению величины напряжения инвертора U_u по мере увеличения тока нагрузки i_d .

Предлагаемый способ повышения коэффициента мощности заключается в том, что при регулировании угла рабочей зоны разрядного диодно-транзисторного плеча по переднему фронту, в зависимости от тока генератора, имеется возможность влиять на наклон внешней характеристики инвертора.

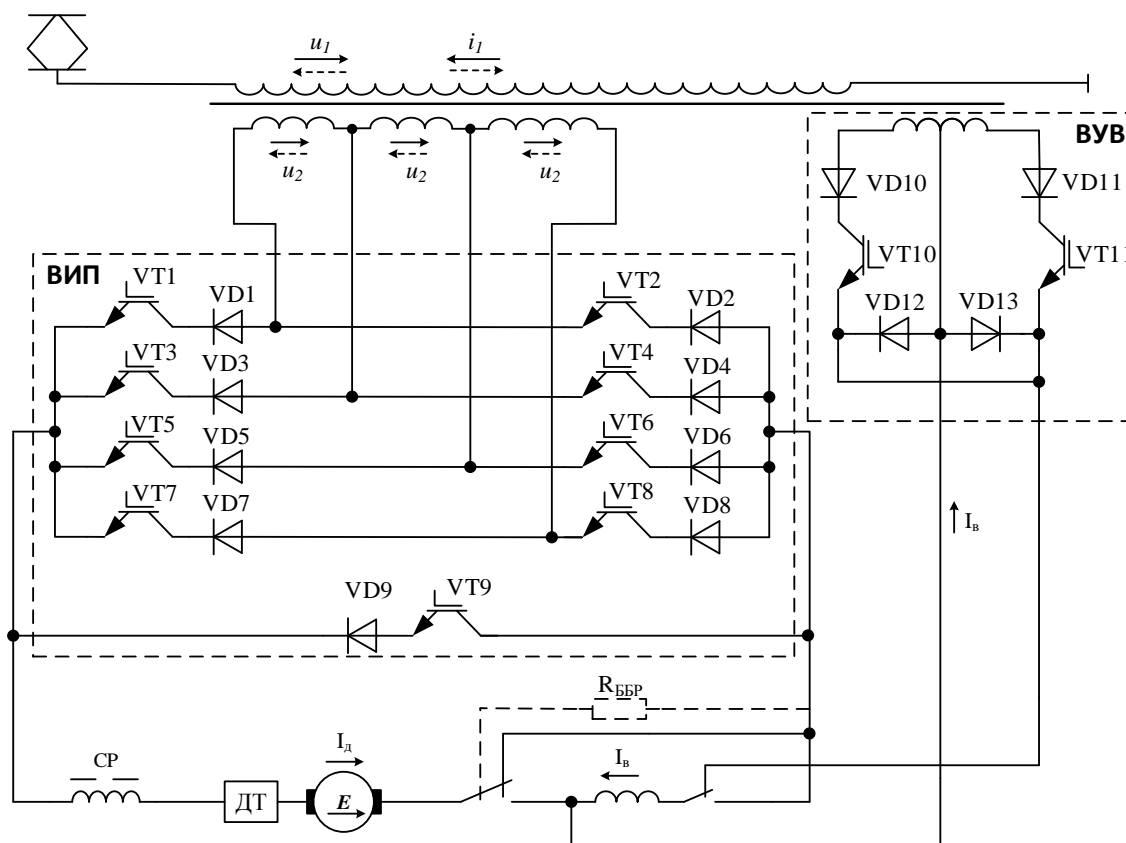


Рис. 2. Упрощенная схема предлагаемой силовой цепи электровоза переменного тока
Fig. 2. Simplified diagram of the proposed power circuit of an AC locomotive

Таким образом, транзисторный ВИП позволяет реализовать рекуперативное торможение без использования блоков балластных резисторов. Статическая устойчивость режима рекуперативного торможения определяется точками пересечения внешних характеристик генератора и инвертора [14]. Взаимный наклон характеристик в этих точках должен удовлетворять условию статической устойчивости, которое определяется неравенством (1):

$$\frac{dU_d}{dI_d} = \frac{dU_u}{dI_d}, \quad (1)$$

где U_d , U_u – напряжение на генераторе и на инверторе, соответственно, В; I_d – ток генератора, А.

На рис. 4 изображены внешние характеристики генератора и инвертора.

Внешняя характеристика генератора без блоков балластных резисторов практически не имеет наклона, так как без дополнительного активного сопротивления в цепи генератора падение напряжения с ростом величины тока невелико. Регулирование угла W_{wreg} от 0 до $\frac{\pi}{2}$ зависимости от значения тока генератора влияет на наклон внешней характеристики инвертора, рис. 3. В точке 1 система формирует сигнал управления открытия на диодно-транзисторное разрядное плечо с максимально возможной задержкой открытия, и по мере увеличения тока генератора значение угла W_{wreg} снижается так, что в точке номинального тока 2 обе рассматриваемые характеристики пересекались. Таким образом, данный способ управления преобразователем позволяет обеспечить статическую устойчивость процесса рекуперации без применения блоков балластных резисторов.

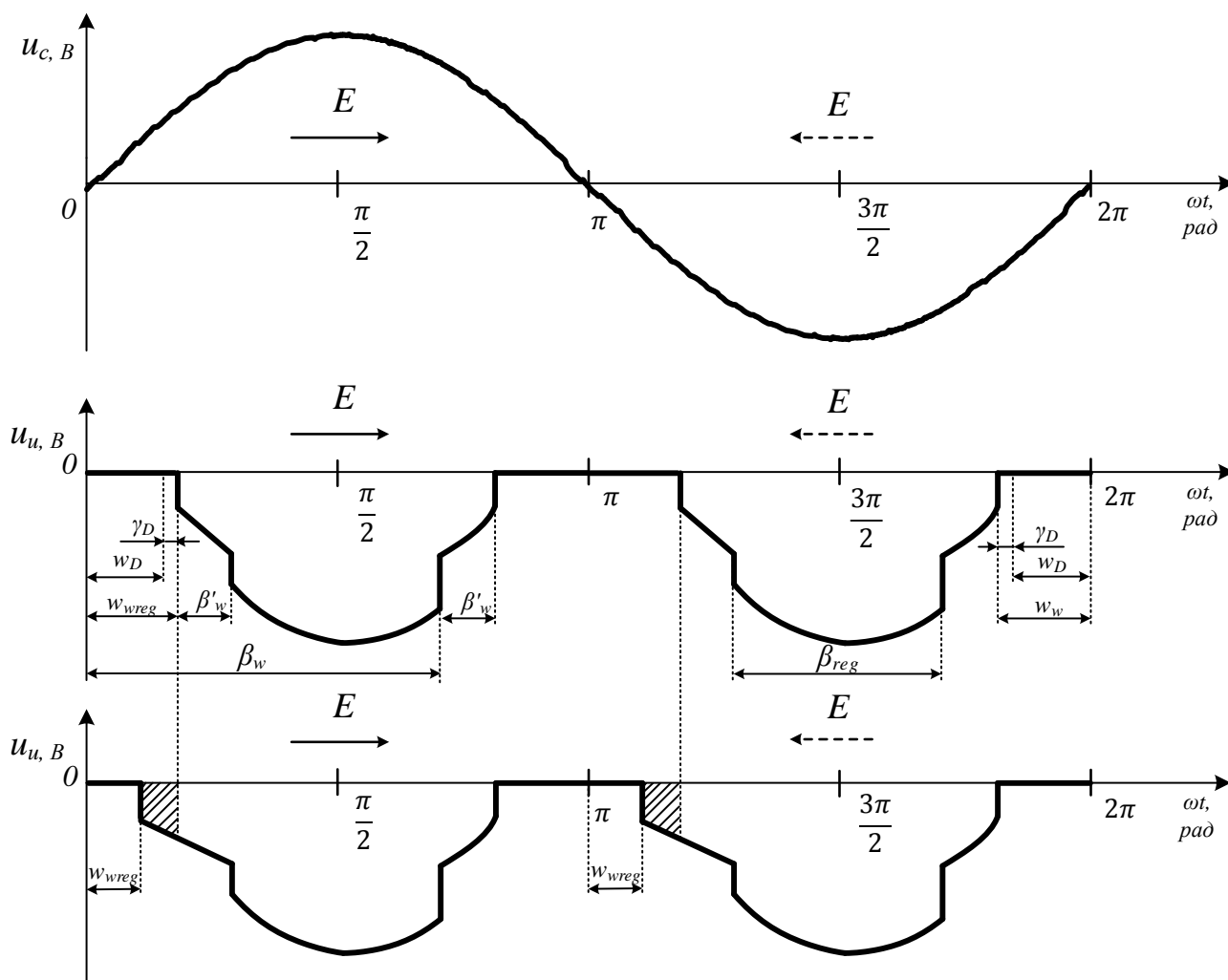


Рис. 3. Диаграмма напряжения инвертора на базе IGBT-транзисторов
Fig. 3. Voltage diagram of an IGBT-based inverter

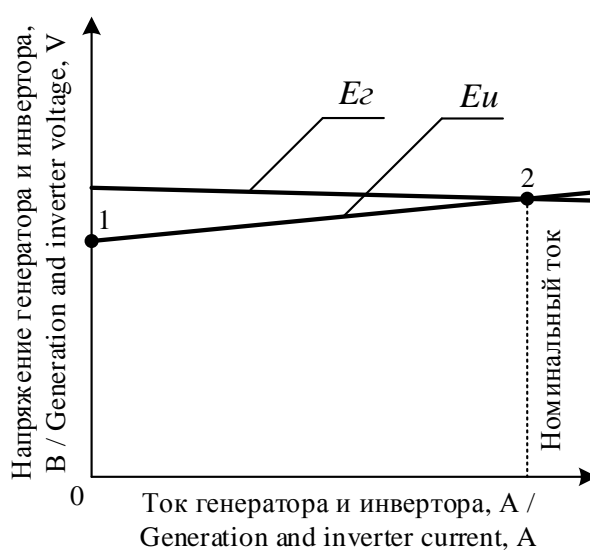


Рис. 4. Внешние характеристики генератора и инвертора электровоза переменного тока
Fig. 4. External characteristics of the AC locomotive generator and inverter

Заключение

1. При работе типовой силовой схемы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, из-за значительного потребления реактивной электроэнергии из контактной сети, наблюдается крайне низкое значение коэффициента мощности, что обусловлено принятым способом управления элементной базы инвертора.

2. Предлагаемый выпрямительно-инверторный преобразователь на базе IGBT-транзисторов значительно увеличи-

вает энергетические показатели электровоза, а разработанный закон управления в режиме инвертирования позволяет реализовать рекуперативное торможение без применения блоков балластных резисторов.

3. Реализация рекуперативного торможения без блоков балластных резисторов позволяет расширить диапазон тормозных характеристик электровоза и значительно повысить величину возвращаемой электровозом в тяговую сеть электроэнергии, положительно на 12%.

Библиографический список

1. Власьевский С.В., Кравчук В.В. Эффективность и проблемы применения рекуперативного торможения на электровозах переменного тока // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2005. № 2 (49). С. 147–158.
2. Власьевский С.В., Кравчук В.В., Палихов А.М. Эффективность применения рекуперативного торможения на Дальневосточной железной дороге // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1975. № 8. С. 5–7.
3. Власьевский С.В. Электрическое рекуперативное торможение на электровозах переменного тока магистральных железных дорог. Проблемы и эффективность его применения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2006. № 1. С. 21–24.
4. Лисунов В.Н., Бабич В.М., Барковский Б.С., Бычков Л.В. Применение рекуперативного торможения на участках переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 1970. № 7. С. 10–11.
5. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав железных дорог. М.: Транспорт, 1969. 408 с.
6. Мельниченко О.В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docplayer.ru/40689498-Melnichenko-oleg-valerevich-povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-tyagovyh-elektroprivodov-elektrovozov-peremennogo-toka.html> (дата обращения: 17.01.2019).
7. Мельниченко О.В., Яговкин Д.А. Выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с использованием IGBT модулей в режиме рекуперативного торможения // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды Всероссийской научно-практической конференции (г. Хабаровск, 25-27 сентября 2013 г.). Хабаровск, 2013. С. 191–192.
8. Мельниченко О.В., Яговкин Д.А., Портной А.Ю., Шрамко С.Г. Инвертор электровоза переменного

- тока с высокими энергетическими показателями // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Материалы Четвертой Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 13–17 мая 2013 г.). Иркутск, 2013. Т. 2. С. 365–368.
9. Мельниченко О.В., Яговкин Д.А., Портной А.Ю., Шрамко С.Г. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для электровозов переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режимах тяги и рекуперативного торможения // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Третьей межвузовской науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 15–19 мая 2012 г.). Иркутск, 2012. Т. 2. С. 539–543.
10. Пат. № 2498490, Российская Федерация, МПК Н02М 5/42. Многозонный выпрямительно-инверторный преобразователь и способ управления преобразователем / Портной А. Ю., Мельниченко О. В., Шрамко С. Г., Полуянов А. Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Иркутский государственный университет путей сообщения. № 2012114982/07; заявл. 16.04.2012; опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31. 7 с.
11. Мельниченко О.В., Линьков А.О., Яговкин Д.А. Development of scientific-and-experimental stand to study operating processes of new transistor converter of alternating current locomotive // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. EMMFT2017. P. 134–144.
12. Рутштейн А.М., Палагута Т.Н. Тенденции развития выпрямительных установок возбуждения тяговых двигателей // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2009. № 2 (58). С. 242–249.
13. Линьков А.О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения [Электронный ресурс]. Режим



доступа: <http://tehnosfera.com/sovershenstvovanie-vypriamitelnoy-ustanovki-vozbuzhdeniya-tyagovyh-dvigatelye-elektrovoza-peremennogo-toka-v-rezhime->

реку (дата обращения: 17.01.2019).

14. Трахтман Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1965. 204 с.

References

1. Vlas'evskij S.V., Kravchuk V.V. The efficiency and problems of application of regenerative braking on AC electric locomotives. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroyeniya [Vestnik VELNII]*, 2005, no. 2 (49), pp. 147–158. (In Russ.).
2. Vlas'evskij S.V., Kravchuk V.V., Palihov A.M. Efficiency of using regenerative braking on the far Eastern railway. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Vestnik of the Railway Research Institute (Vestnik VNIIZHT)]*, 1975, no. 8, pp. 5–7. (In Russ.).
3. Vlas'yevskiy S.V. Electric recuperative braking on alternating current electric locomotives of the main railways. Problems and effectiveness of its use. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* («EET») [Electronics and electrical equipment of transport (EET)], 2006, vol. 1, pp. 21–24. (In Russ.).
4. Babich V.M., Barkovskij B.S., Bychkov L.V. The use of regenerative braking in the areas of alternating current // *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* («EET») [Electronics and electrical equipment of transport (EET)], 1970, vol. 7, pp. 10–11.
5. Tihmenev B.N., Trahtman L.M. *Podvizhnoj sostav zheleznih dorog* [Rolling stock of railways]. Moscow: Transport Publ., 1969, 408 p. (In Russ.).
6. Mel'nichenko O.V. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti tyagovyh elektropriwodov elektrovozov peremennogo toka* [Increase of energy efficiency of traction electric drives of AC electric locomotives]. URL: <https://docplayer.ru/40689498-Melnichenko-oleg-valerevich-povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-tyagovyh-elektropriwodov-elektrovozov-peremennogo-toka.html> (available at: 17 January 2019).
7. Mel'nichenko O.V., Yagovkin D.A. *Vypriamitel'no-invertornyj preobrazovatel' dlya tyagovogo podvizhnogo sostava peremennogo toka s ispol'zovaniem IGBT modulej v rezhime rekuperativnogo tormozheniya* [Rectifier-inverter converter for AC traction rolling stock using IGBT modules in the regenerative braking mode] // *Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti. Trudy vserossijskoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Electric drive in transport and industry: Proceedings of All-Russian scientific and practical conference, Habarovsk, 25–27 September 2013]. Habarovsk, 2013, pp. 191–192. (In Russ.).
8. Mel'nichenko O.V., Yagovkin D.A., Portnoj A.Yu., Shramko S.G. *Invertor elektrovoza peremennogo toka s vysokimi energeticheskimi pokazatelyami* [Inverter of an AC electric locomotive with high energy indices]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. Materialy Chetvertoj Vserossijskoy nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Transport infrastructure of the Siberian region. Materials of the Fourth All-Russian scientific and practical conference with International participation, Irkutsk, 13–17 May 2013]. Irkutsk, 2013, pp. 365–368. (In Russ.).
9. Mel'nichenko O.V., Yagovkin D.A., Portnoj A.Yu., Shramko S.G. *Novyj vypriamitel'no-invertornyj preobrazovatel' dlya elektrovozov peremennogo toka s povyshennymi energeticheskimi harakteristikami v rezhimakh tyagi i rekuperativnogo tormozheniya* [A new rectifier-inverter converter for AC electric locomotives with increased energy characteristics in traction and regenerative braking modes]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy Tretej mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transport infrastructure of the Siberian region. Materials of the Third All-Russian interuniversity scientific and practical conference, Irkutsk, 15–19 May 2012]. Irkutsk, 2012, vol. 2, pp. 539–543. (In Russ.).
10. Pat. No. 2498490, Russian Federation, MPK H02M 5/42. *Mnogozonnyj vypriamitel'no-invertornyj preobrazovatel' i sposob upravleniya preobrazovatelem* [Multi-zone rectifier-inverter converter and a converter control method] / Portnoj A. Yu., Mel'nichenko O. V., Shramko S. G., Poluyanov A.G.; applicant and patent holder of the FSBEI HPE Irkutsk state Transport University.No. 2012114982/07; applied 16 April 2012; published 10 November 2013. Bulletin no.31. 7 p.
11. Mel'nichenko O.V., Lin'kov A.O., Yagovkin D.A. Development of scientific-and-experimental stand to study operating processes of new transistor converter of alternating current locomotive // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. EMMFT2017. P. 134–144.
12. Rutshtejn A.M., Palaguta T.N. Development trends of rectifying excitation units of traction engines. *Vestnik VELNII*. 2009. No. 2 (58). S. 242–249.
13. Lin'kov A.O. *Sovershenstvovanie vypriamitel'noj ustanovki vozbuzhdeniya tyagovyh dvigatelej elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya* [Improving the rectifier installation of AC electric locomotive traction motor excitation in the regenerative braking mode] Candidate's dissertation in technical sciences: 05.22.2007. Irkutsk, 2015, 177 p. (available at: 17 January 2019).
14. Trahtman L.M. *Elektricheskoe tormozhenie elektropodvizhnogo sostava* [Electric braking of an electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1965, 204 p.

Критерии авторства

Томилов В.С., Баринов И.А., Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Томилов Вячеслав Станиславович,
аспирант,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: slavatomilov22@gmail.com

Баринов Игорь Александрович,
аспирант,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: ib4558@yahoo.com

Мельниченко Олег Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электроподвижного состава,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: olegmelnval@mail.ru

Шрамко Сергей Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры электроподвижного состава,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: novorossereg@mail.ru

Линьков Алексей Олегович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры электроподвижного состава,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: linkovalex@mail.ru

Authorship criteria

Tomilov V.S., Barinov I.A., Melnichenko O.V., Shramko S.G., Linkov A.O. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav S. Tomilov,
Postgraduate student,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: slavatomilov22@gmail.com

Igor A. Barinov,
Postgraduate student,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: ib4558@yahoo.com

Oleg V. Melnichenko,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Electric Rolling Stock,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: olegmelnval@mail.ru

Sergey G. Shramko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Electric Rolling Stock,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: novorossereg@mail.ru

Aleksey O. Linkov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Electric Rolling Stock,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: linkovalex@mail.ru



Особенности применения твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов

© Е.С. Горланов

ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ», г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Цель – исследование процессов электроосаждения бора, титана и алюминия на углеграфитовых катодах; определение возможных путей преодоления существующих ограничений применения твердых катодов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Рентгенофазовый анализ проводился на автоматизированном рентгеновском дифрактометрическом оборудовании фирмы Shimadzu XRD-6000 (излучение CuK_α , графитовый монохроматор). Микроструктура поверхности образцов исследовалась на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 7001F (Япония). Рентгеноспектральный микроанализ, энергодисперсионный микроанализ электродвижущей силы (SEM-EDS анализ) и ЭДС-картирование (EDS-mapping) выполнены на энергодисперсионном спектрометре Oxford Instruments (Великобритания). По результатам реализации электрохимического синтеза диборида титана TiB_2 при температуре $\sim 975^\circ\text{C}$, плотности тока $0,82 \text{ A/cm}^2$ с последующим осаждением алюминия на углеродном катоде и исследованием поверхности методами рентгенофлуоресцентного анализа, а также электронной микроскопии предположены причины нестабильного течения процесса электролиза и неудовлетворительного качества покрытий. Такими причинами могут выступать химическая неоднородность и физическая микродефектность поверхности, которые инициируют концентрацию тока на микроплощадках дефектов с одновременным увеличением скорости процессов электролиза. Последующий дефицит электроактивных ионов в прикатодном пространстве приближает, а затем достигает плотности тока выше предельной диффузионной последовательно для разряда бора, титана и алюминия с возрастанием напряжения до потенциалов разложения фтора – криолита, фтористых натрия и алюминия. Последствиями этих процессов являются: взаимодействие собственных и примесных агрессивных элементов с материалом поверхности, прогрессирующее развитие физической микродефектности и пассивация катода тугоплавкими осадками, а также составляющими электролита. В конечном итоге нормальный процесс электролиза нарушается с последующей необходимостью остановки. Одна из причин отсутствия прогресса в развитии технологии электролиза с применением «инертных» электродов заключается в специфических электрохимических процессах на твердой поверхности поликристаллических катодов. Установленная причинно-следственная связь между неоднородностью электродной поверхности, нестабильностью процесса электролиза и пассивацией катода позволяет определить условия применения твердых катодов. Для решения этих проблем предложено воспользоваться разработанными в лабораторных условиях технологиями борирования композитных катодов и низкотемпературного синтеза диборида титана.

Ключевые слова: электрохимический синтез, электроосаждение, твердый электрод, химическая неоднородность, физическая микродефектность, предельная диффузионная плотность тока

Информация о статье: Дата поступления 4 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Горланов Е.С. Особенности применения твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 356–366. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-356-366.

Features of solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis

Evgeniy S. Gorlanov

EXPERT-AL LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract: The purpose of the article is to study the processes of boron, titanium and aluminum electrodeposition on carbon graphite cathodes, identify the possible ways to overcome the existing restrictions on the use of solid cathodes for cryolite-alumina melt electrolysis. X-ray diffraction analysis (XRD) was carried out using Shimadzu XRD-6000 automated x-ray diffractometric equipment (CuK_α radiation, graphite monochromator). The microstructure of the sample surface was exam-

ined with the use of the JEOL JSM 7001F scanning electron microscope (Japan). X-ray microanalysis and energy dispersive microanalysis (SEM-EDS analysis) as well as EDS-mapping were performed using the Oxford Instruments energy dispersive spectrometer (UK). The results of the electrochemical synthesis of titanium diboride TiB_2 at the temperature of $\sim 975^\circ C$ and current density of $0.82 A/cm^2$ with the subsequent deposition of aluminum on the carbon cathode and surface study by electron microscopy suggested the causes of the unstable electrolysis and poor quality of coatings. These causes can include chemical heterogeneity and physical microdefects of the surface, which initiate the concentration of current on the micro-sites of defects with simultaneous increase in the electrolysis rate. The subsequent shortage of electroactive ions in the cathode space approximates and then reaches the current density above the limiting diffusion one successively for the discharge of boron, titanium and aluminum with a subsequent increase in voltage to background decomposition potentials (cryolite, sodium and aluminum fluoride). These processes result in the interaction of intrinsic and impurity aggressive elements with the surface material, the progressive development of physical micro-defects as well as cathode passivation with refractory sediments and electrolyte components. Ultimately, the normal process of electrolysis is disrupted and followed by the need to stop. One of the reasons for the lack of progress in the development of electrolysis technology with the use of inert electrodes lies in the specific electrochemical processes on the solid surface of polycrystalline cathodes. The established causal-and-effect relationship between the heterogeneity of the electrode surface, the instability of the process of electrolysis and cathode passivation makes it possible to determine the application conditions of solid cathodes. To solve these problems, it is proposed to use the technologies of composite cathode boronation and low-temperature synthesis of titanium diboride developed in laboratory conditions.

Keywords: electrochemical synthesis, electrodeposition, solid electrode, chemical heterogeneity, physical micro defects, limiting diffusion density of current

Information about the article: Received February 4, 2019; accepted for publication March 12, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Gorlanov E.S. Features of solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 356–366. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-356-366.

Введение

Применение электролизеров нового поколения с дренированными катодами и с вертикальным расположением электродов предполагают использование крупногабаритных прессованных или литых электродных изделий из материалов, инертных или малорасходуемых в агрессивной среде. В 2000 г. Credit Suisse First Boston Corporation публикует обзор наиболее значимых исследований в этой области мировыми производителями алюминия [5]. Анализируя состояние этих разработок, автор обзора объявляет неизбежной «Алюминиевую революцию» в течение 5–10 лет и предрекает модернизацию заводов с переходом на технологию, использующую электролизеры с инертными электродами. Революции не произошло до настоящего времени, ни одним из мировых алюминиевых производителей и научно-исследовательских центров эти вопросы не решены полностью и окончательно. Чтобы заполнить этот пробел, объявлена очередная алюминиевая «революция» – электронным изданием международного научного журнала «Nature» в мае

2018 г. анонсировано появление инновационной компании [2]. Алюминиевые гиганты Alcoa Corporation и Rio Tinto Aluminum объявили о создании в Монреале (Канада) совместного предприятия Elysis, которая планирует к 2024 г. на территории Канады внедрить революционную технологию электролиза с применением инертных электродов, называя ее «малоуглеродистой».

Принимая во внимание очередную «алюминиевую революцию», развитием которой компания Alcoa занимается около 35 лет, а ОК «РУСАЛ» находится у порога внедрения инертных анодов около 15 лет, сокращение сроков ее реализации и преодоление существующих проблем требует поддержки научным потенциалом и практическими наработками академических институтов. И, прежде всего, обратим внимание на то, что в отчете исследовательского центра Alcoa 2001–2002 годов об испытаниях электролизеров с вертикальными электродами основной проблемой развития этой конструкции ванн указывается не инертный анод, а горячепрессованный TiB_2 катод [2].



Суть проблемы не раскрывается, но указывается и исследуется присутствие в плотных катодных изделиях оксидов, которые появляются на стадии их изготовления, в процессе обжига и пуска ванны. По-видимому, дело не только в высокой стоимости изделий из диборида титана, но в особенностях катодных процессов на твердых поликристаллических катодах при электролизе криолитоглиноземных расплавов. Например, в недавней работе [4] при испытаниях лабораторного электролизера с вертикальными электродами из диборидтитанового композита TiB_2 -C приближение к промышленным плотностям тока приводило к пассивированию катода компонентами электролита, про-

цесс электролиза прекращался (рис. 1).

В этой связи, для понимания и решения проблемы, но эволюционным путем, необходимо изучить и понять некоторые аспекты и возможные направления создания смачиваемых объемных материалов или катодных покрытий. Проведены исследования особенностей электрохимического осаждения и синтеза смачиваемого покрытия на углеродном катоде с последующим электролизом криолитоглиноземных расплавов. Одновременно определялись ограничения на использование твердых катодов для электролитического производства алюминия и возможные технологические приемы для снятия этих ограничений.

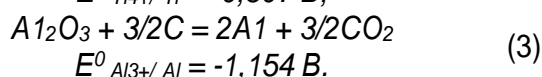
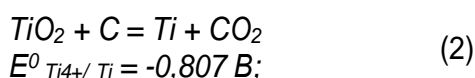
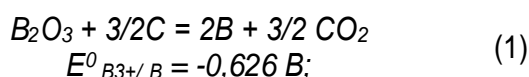


0.31 A/cm² (Left) VS. 0.65 A/cm² (Right)

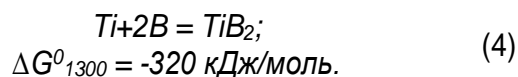
Рис. 1. Катоде после электролиза при 0,31 /см² (слева) и 0,65 А/см² (справа) [4]
Fig. 1. Cathodes after electrolysis at 0.31 A/cm² (left) and 0.65 A/cm² (right) [4]

Технология последовательного осаждения на катоде бора, титана и алюминия

Теоретически, формальные ограничения на восстановление титана, бора и алюминия на инертном или реактивном катоде отсутствуют. Напряжения разложения оксидов этих металлов, рассчитанные на основании термодинамической вероятности процессов на углеродном катоде, составляют:



Последовательное восстановление титана и бора предполагает их последующее взаимодействие с образованием смачиваемого алюминием слоя диборида титана:



После его формирования на углеродной поверхности можно приступить к электролизу криолитоглиноземных расплавов по стандартной технологии с дренированным катодом или вертикальными электродами.

Эксперимент и обсуждение результатов

В попытках реализации этого процесса в лабораторных условиях было замечено, что стабильность электролиза зависит от начального качества поверхности углеродных катодов, которые изготавливались фрезерованием до установленных размеров, т.е. макродефекты от инструмента в виде борозд, вскрытой пористости, задигов, наплывов влияли на динамику напряжения в течение всего эксперимента. Чтобы минимизировать это влияние, для экспериментов отбирались образцы катодов с визуальной качественной, гладкой поверхностью.

Представим результаты одной из наших многочисленных попыток синтеза диборида титана на углеродном катоде с последующим электролизом криолитоглиноземных расплавов в течение 24 ч при расчетной геометрической плотности тока $0,82 \text{ A/cm}^2$ и температуре около 975°C . В качестве анода использовали графитовый ти-

гель, углеродный катод диаметром 30 и высотой 50 мм погружали в электролит на глубину 35–40 мм. В расплав на основе криолита технического на 1-м этапе добавляли буру, на втором – оксид титана и на финальной стадии в течение 2-х ч – оксид алюминия. В гальваностатических условиях динамика напряжения в течение эксперимента регистрировалась непрерывно автоматическим измерительным комплексом ИК 4-2 («НТЦ ЭЛТЕР»). Наличие алюминия на катоде в конце опыта являлось визуальным индикатором смачиваемой поверхности.

Через каждые 2 ч из расплава отбирали пробы для контроля состава электролита методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Как следует из результатов анализа, оксид бора B_2O_3 присутствует в расплаве, как в свободном виде, так и в комплексах с другими оксидами $\text{Ca}_3(\text{BO}_3)_2$ и $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ с самого начала эксперимента (рис. 2).

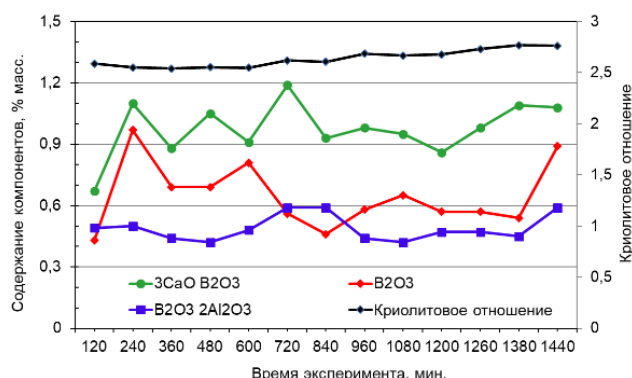


Рис. 2. РФА состава электролита
 Fig. 2. Electrolyte composition XRD

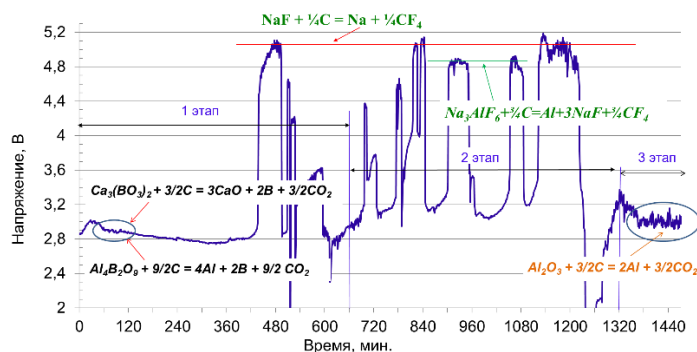
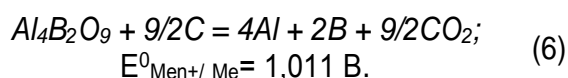
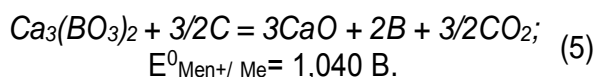


Рис. 3. Динамика напряжения эксперимента
 Fig. 3. Experiment voltage dynamics



Учитывая результаты РФА и полученные ранее данные по уровням напряжения, при которых происходит разложение тех или иных соединений, предполагаем, что в начале эксперимента при напряжении около 2,900 В реализуются процессы восстановления бора и алюминия из образующихся комплексов (рис. 3).



Получаем $U_{\text{экср.}} = 2,900 \text{ В.}$

Но эти процессы (5) и (6) в чистом виде происходили в течение 60 мин начального участка, после чего взаимодействие восстанавливаемых компонентов между собой и с материалом катода вызвали устойчивый и усиливающийся деполяризующий эффект ($\Delta E_{\text{Деп}}$) катодных процессов (табл. 1).

До 360 мин напряжение стабильно снижалось к 2,800 – 2,780 В на величину развивающейся деполяризации (рис. 3), т.е.

в конечном итоге на $2,900 - 2,780 = 0,120 \text{ В}$, что согласуется с теоретической деполяризацией (см. табл. 1).

Далее, после 360 мин, окончание 1 этапа и весь 2-й этап потенциал катода и напряжение ячейки ($U_{\text{экср.}}$) резко сдвигается в электроотрицательную сторону до значений потенциалов разложения составляющих электролита (см. рис. 3, табл. 2).

Явление самопроизвольного повышения напряжения до разряда наиболее электроотрицательных компонентов обычно объясняется концентрационной поляризацией катода, хотя в данном случае содержание поставщиков электроактивных компонентов в объеме электролита существенно не изменялось в течение всего эксперимента (см. рис. 2).

Но существует другой механизм возникновения катодной концентрационной поляризации, связанный с качеством поверхности электрода. При исследовании углеродных катодов после экспериментов методами электронной микроскопии во всех случаях обнаруживалась высокая микродефектность поверхности (рис. 4).

Таблица 1

Процессы развивающейся катодной деполяризации

Table 1

Processes of developing cathodic depolarization

Реакции	ΔG^0_R , кДж/моль	$\Delta E_{\text{Деп}}$, В
$\text{Al} + 12\text{B} = \text{AlB}_{12}$	-174,00	0,046
$4\text{B} + \text{C} = \text{B}_4\text{C}$	-58,10	0,050
$\text{Al} + 2\text{B} = \text{AlB}_2$	-54,90	0,063
$4\text{Al} + 3\text{C} = \text{Al}_4\text{C}_3$	-131,64	0,114
$\text{CaO} + 2/3\text{Al} = \text{Ca} + 1/3\text{Al}_2\text{O}_3$	-136,02	0,117

Таблица 2

Значения потенциалов разложения составляющих электролита

Table 2

Values of decomposition potentials of electrolyte components

Реакции при $j_{\text{расч.}} = 0,82 \text{ А/см}^2$	$ E^0_{\text{Men+}/\text{Me}} $, В	$U_{\text{экср.}}$, В	—
$\text{NaF} + 1/4\text{C} = \text{Na} + 1/4\text{CF}_4$	2,702	5,030	(1)
$\text{Na}_3\text{AlF}_6 + 3/4\text{C} = \text{Al} + 3\text{NaF} + 3/4\text{CF}_4$	2,520	4,830	(2)
Разность потенциалов	0,182	0,200	—

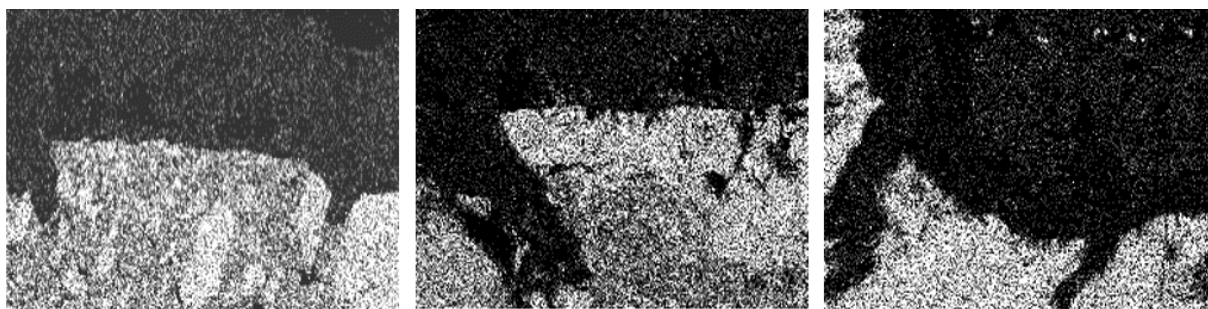
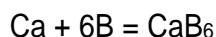
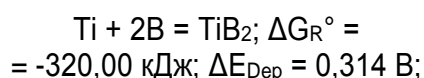


Рис. 4. ЭДС-карты углеродной поверхности катода после электролиза (×55)
 Fig. 4. EDS-maps of cathode carbon surface after electrolysis (× 55)

Развивающаяся исходная физическая неоднородность катода, за счет неоднородности химических (или реакций с участием электродной поверхности, см. табл. 1), генерирует на микроплощадках микродефектов высокую флуктуирующую плотность тока ($j_{\text{флукт.}}$). По достижении некоторой критической концентрации микродефектов $j_{\text{флукт.}}$ трансформируется в действительную катодную плотность тока ($j_{\text{действ.}}$), резко увеличивающую скорость процессов (5) и (6) на катоде. И это, в свою очередь, создает неизбежный дефицит электроактивных ионов в прикатодном диффузионном слое с последующим развитием процессов разряда наиболее электроотрицательных компонентов расплава, а в предельном случае – разложение составляющих фона, т.е. электролита по реакциям (1) и (2).

В течение этих негативных процессов при высоком напряжении происходит турбулентия расплава с частичным или полным растворением оксидных комплексов. По мере накопления ионов Ca^{2+} , Al^{3+} , Ti^{4+} и V^{3+} в прикатодном объеме электролита происходило временное снижение напряжения электролиза до потенциалов их разложения (нижние площадки см. рис. 3). Возможно, именно таким образом создавались условия для образования боридов титана и кальция, содержание которых в поверхностном слое катода по данным РФА составляет соответственно 0,53 и 1,03 масс. %.



$$\Delta G_R^\circ = -533,81 \text{ кДж}$$

$$\Delta E_{\text{Dep}} = 0,275 \text{ В.}$$

В электролите с поверхности катода помимо 1,19 масс. % B_2O_3 обнаружены комплексы $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$, $\text{Ca}_3(\text{BO}_3)_2$ и NaCaAlF_6 в количестве 0,59, 1,08 и 1,33 масс. %, соответственно (результаты РФА).

Скопление осадков на катоде, т.е. его пассивация, требовали вмешательства в процесс электролиза и выбора порядка действий – остановки эксперимента или очистки катода. После кратковременного неоднократного механического встряхивания электрода перед началом финального 3-го этапа и подачи глинозема в электролит, процесс электролиза вернулся к стабильному течению с разложением оксида алюминия $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}^0$ при напряжении около 3,020 В (см. рис. 3). После извлечения образца из ячейки на погруженной части катода обнаружен слой алюминия с удовлетворительной адгезией к углероду. Но нестабильная динамика процесса электролиза стала причиной значительной турбулентии алюминиевого слоя и возникновения прослойки электролита между торцевой поверхностью катода и металлом. Это означает, что адгезия алюминия к катодной поверхности, несмотря на присутствие некоторого количества TiB_2 , недостаточная для сохранения целостности алюминиевого слоя. Это подтверждается ЭДС-картированием участка поперечного сечения электрода (рис. 5). В контрастной области отчетливо и полностью совпадают области распределения Na, Al и F.

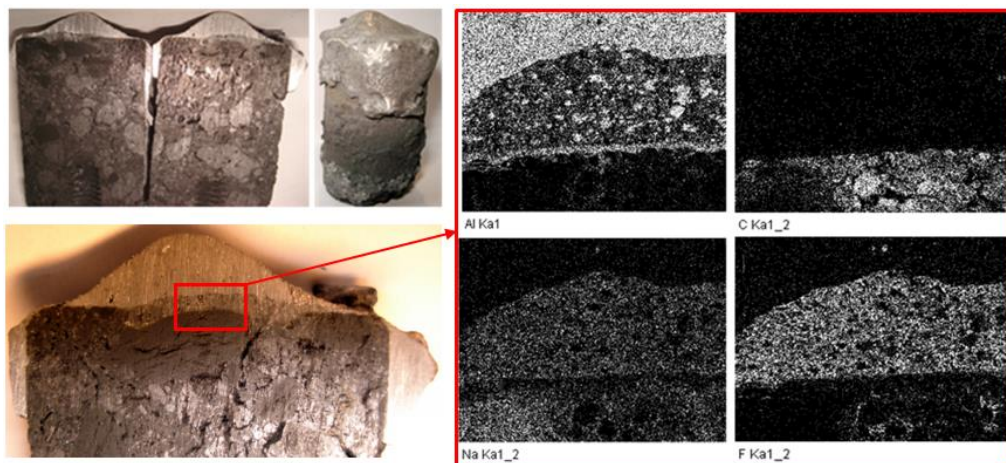


Рис. 5. Внешний вид перевернутого катода после эксперимента и ЭДС-карты Al, C, Na и F на выделенном участке между алюминием и поверхностью катода (×55)
Fig. 5. External view of the inverted cathode after the experiment and an EDS map of Al, C, Na, and F in the specified area between the aluminum and the cathode surface (× 55)

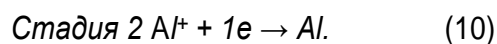
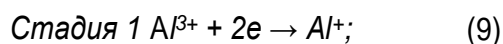
Электролиз расплавленных солей с применением твердых углеродных катодов

Представленная динамика напряжения электролиза с применением вертикально расположенного углеродного катода и результаты экспериментов имеют хорошую воспроизводимость и во многом похожи на результаты, полученные авторами [4] при испытании лабораторных электролизеров с вертикальным TiB_2 -C катодом (см. рис. 1). В обоих случаях это связано с присутствием на поверхности поликристаллических катодных мономатериалов или композитов химической неоднородности и физической микродефектности, которые изначально приобретаются в технологическом цикле синтеза исходных порошковых материалов, при их прессовании и термической обработке.

Химическая микро- и макродефектность изделий проявляется в присутствии на поверхности и по границам зерен наполнителя оксидных пленок и включений различной интенсивности. Например, в работах [5, 6] авторы фиксировали большие различия в сопротивлении керамики TiB_2 коррозионному воздействию алюминия в зависимости от присутствующих в структуре вторичных фаз. При 1000°C они наблюдали проникновение алюминия в компактный TiB_2 , содержащий по границам зерна вторичную фазу оксикарида титана $TiC_{1-x}O_x$ и Ti_2CN .

При этом происходит деградация всех исходных свойств плотного диборида титана.

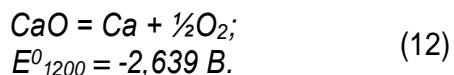
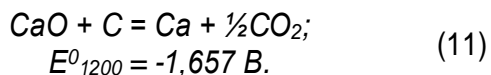
В этой связи заметим, что процессы восстановления алюминия на индифферентных твердых катодах (например, из вольфрама или диборида титана) проходят в две стадии [7]:



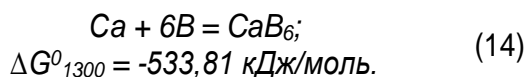
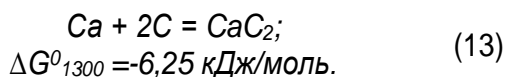
Присутствие на катоде чрезвычайно агрессивных субионов алюминия Al^{+} (по отношению к материалам электродов) многократно увеличивает разрушительное воздействие алюминия по механизмам, исследованным авторами [5, 6]. Причем в данном случае коррозионному воздействию будут подвергаться не только катоды, но и расположенные на минимальном расстоянии (2–3 см) аноды.

Постоянный ток концентрируется на узких гранях, ребрах, микротрещинах, точечных площадках выступающих микронеровностей (с возникновением высокой $j_{\text{действ.}}$). То есть действительная плотность тока может быть не только выше расчетной геометрической катодной, но и значительно превышать предельную диффузионную для

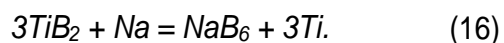
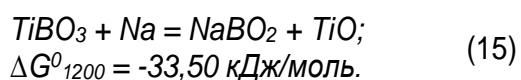
разряда алюминия. При таких высоких действительных плотностях тока в условиях концентрационной поляризации на катоде будут формироваться порошковые осадки из наиболее электроотрицательных примесных электроактивных компонентов, например:



В свою очередь, эти элементы с высокой вероятностью могут взаимодействовать с материалом катода или его составляющими, формируя изолирующий слой:

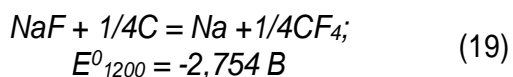
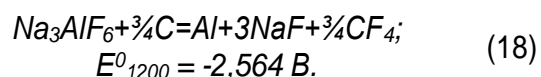
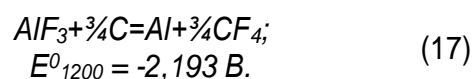


Кроме того, в условиях концентрационной поляризации и обогащении прикатодного объема электролита ионами натрия происходит их разряд на инертном катоде с последующим взаимодействием с материалом поверхности и его вторичными фазами:

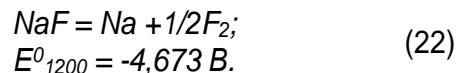
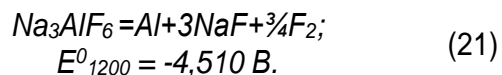
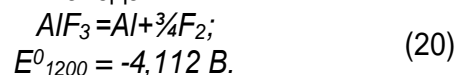


Эти вероятные процессы также изменяют состав поверхности катода, пассивируют ее метаборатом натрия NaBO_2 ($T_{\text{плавл.}} = 966^\circ\text{C}$) или гексаборатом натрия NaB_6 , являющимся изолятором с удельным электросопротивлением около $4 \cdot 10^6$ Ом·см [8]. А частичное или полное растворение бората натрия NaBO_2 в электролите будет прогрессивно увеличивать микродефектность катода. Этот процесс подтверждался результатами специальных исследований авторов [9].

Обобщая, макро- и микроучастки катодной поверхности мономатериалов или композитов имеют начальную физическую микродефектность (см. рис. 4), а также большую или меньшую реакционную активность по отношению к агрессивным компонентам рабочей среды. При продолжительной работе в такой среде, то есть с развитием физической микродефектности и сдвигом катодной поляризации в отрицательную сторону, на катоде возможно разложение компонентов электролита на реактивных катодах



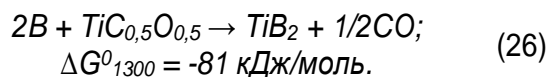
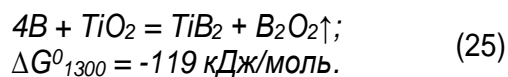
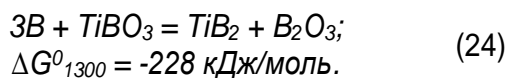
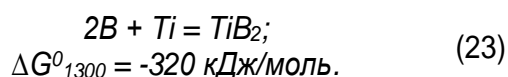
или инертных катодах



с соответствующими негативными последствиями для катодных процессов и состояния электродов. Эти последствия, в условиях пассивирования электрода примесными осадками и обогащения объема расплава и приэлектродного пространства фторидом натрия, будут выражаться во взаимодействии собственных и примесных элементов с материалом катода, а также локальным повышением температуры плавления расплава в прикатодном пространстве. В результате поверхность не только будет менять свой состав и физическое состояние, но и изолироваться намерзающим на электроде электролитом, тугоплавкими соединениями примесей. В конечном итоге нормальный процесс электролиза нарушается с последующей необходимостью остановки.

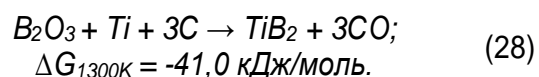
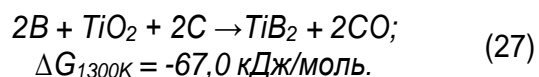


Таким образом, твердые поликристаллические катоды из индивидуальных соединений или их композиций не могут *безусловно* использоваться для электролиза криолитоглиноземных расплавов в любом исполнении, в горизонтальном и вертикальном. Логичным *условием* их применения является организация процессов непрерывного восстановления катодной поверхности, уменьшение ее химической неоднородности и микродефектности в течение всего периода электролиза. Например, для катодов на основе диборида титана технология электролиза криолитоглиноземных расплавов должна сопровождаться микродозированием бора в электролит, восстановлении его на катоде с последующим взаимодействием на поверхности и в объеме электрода между исходными и примесными компонентами:



Эти процессы будут не только восстанавливать исходный состав катода, но и устранять микродефектность его поверхности.

В лабораторных условиях подобная технология успешно реализована в способе непрерывного борирования углеродных титаносодержащих катодов [10, 11]. Механизм формирования смачиваемого алюминием *Ti-B-C* катодного слоя и непрерывное его восстановление реализуется через последовательно-параллельные стадии встречных твердо- и жидкофазных потоков бора и титана (в элементарном виде и в виде соединений), с последующим взаимодействием между ними (23)–(26) и с основой композита:



Углерод-титан-содержащие катоды и борсодержащие аноды могут изготавливаться на электродном заводе и анодной фабрике с дозированием в их состав титан- и борсодержащих соединений. В качестве катодов могут быть использованы как диборидтитановые, так композитные составы *TiB₂ - CG* (диборид титана–углеграфит), полученные с применением низкотемпературного синтеза диборида титана [12, 13].

Заключение

1. Технология электрохимического осаждения бора, титана и алюминия на углеродном катоде из криолитоглиноземных расплавов при ~975°C и плотности тока 0,82 А/см² обеспечивает *визуальное* смачивание электрода алюминием. Результаты процесса находятся в прямой зависимости от качества поверхности поликристаллического катода.

2. Многолетнее отсутствие прогресса коммерческого развития технологии электролиза криолитоглиноземных расплавов с применением инертных электродов

предложено объяснять специфическими электрохимическими процессами на катодной поверхности.

3. Химическая и физическая неоднородность поверхности катодов является причиной периодического возникновения концентрационной поляризации, нестабильности электрохимических процессов, последствия которых выражаются во взаимодействии примесных элементов с материалом катода и разложением составляющих электролита. В результате поверхность ка-

тогда не только меняет свой состав и физическое состояние, но и пассивируется тугоплавкими соединениями примесей, намерзающим на электроде электролитом.

4. Установленная причинно-следственная связь между неоднородностью электродной поверхности и нестабильностью катодного процесса дает основания утверждать:

- твердые поликристаллические катоды из индивидуальных соединений или их композиций не могут *безусловно* использоваться для электролиза криолитоглиноземных расплавов в любом исполнении, в горизонтальном и вертикальном;
- логичным *условием* применения

твердых катодов является организация процессов электролиза с непрерывным восстановлением поверхности, уменьшением ее химической неоднородности и микродефектности в течение всего технологического периода.

5. Для технологического и конструктивного развития электролизеров нового поколения предложено использовать технологию непрерывного микроборирования поверхности индивидуальных TiB_2 или композитных TiB_2 – CG катодов, изготовленных с использованием технологии низкотемпературного синтеза диборида титана, формируя изолирующий слой.

Библиографический список

1. Leeuwen T.M. An Aluminum Revolution // Equity Research Report, Credit Suisse First Boston Corporation, June 22, 2000. 110 p.
2. Aluminium producers promise a cleaner smelting pot [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-05158-1>. (дата обращения: 20.01.2019).
3. Christini R. A., Dawless R. K., Ray S. P., Weirauch D. A. Advanced Anodes and Cathodes Utilized in Energy Efficient Aluminum Production Cells // Final Technical Progress Report for Phase III, Cooperative Agreement Number DE-FC07-98ID13666. 2001. No. 5. 92 p.
4. Bao Sh., Chai D., Shi Z., Wang J., Liang G., and Zhang Y. Effects of Current Density on Current Efficiency in Low Temperature Electrolysis with Vertical Electrode Structure // Light Metals. 2018. P. 611–619.
5. Jensen M. S., Pezzotta M., Zhang Z.L., Einarsrud M.-A., Grande T. Degradation of TiB_2 ceramics in liquid aluminum // J. Eur. Ceram. Soc. 2008. Vol. 28. P. 3155–3164.
6. Saai A., Wang Z., Pezzotta M., Friis J., Ratvik A. P., and Vullum P. E. Multi-scale Modelling of Titanium Diboride Degradation Using Crystal Elasticity Model and Density Functional Theory // Light Metals. 2018. P. 1329–1336.
7. Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. *Металлургия алюминия и магния*. М.: Metallurgy, 1987. 320 с.
8. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. *Бориды*. М.: Атомиздат, 1975. 376 с.
9. Wang Z., Friis J., Ratvik A. P. Transport of Sodium in TiB_2 Materials Investigated by a Laboratory Test and DFT Calculations // Light Metals. 2018. P. 1321–1328.
10. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu. Nano- and the Microdimensional Coats Polycrystal Titanium-Containing the Bases a Method of Electrochemical Boronizing // Smart Nanocomposites. USA, Nova Science Publishers, Inc. 2016. Vol. 7. № 1. P.75–88.
11. Пат. 2337184 Российская Федерация, МПК7 C25C 3/08. Способ получения и поддержания защитного смачиваемого покрытия на углеродистых блоках катодного устройства электролизёра для производства алюминия / Е.С. Горланов: Общество с ограниченной ответственностью «Эксперт-Ал». – № 2006142406/02; заявл. 30.11.2006; опубл. 27.10.2008 Бюл. №30. 11 с.
12. Пат. 2603407 РФ. МПК B22F 9/18, C01B 35/04, C01G 23/00. Способ получения порошка диборида титана / Е.С. Горланов, В.Ю. Бажин, А.В. Смань; заявитель и патентообладатель ООО "Эксперт-Ал" 2015107637/02; опубл. 30.04.2015. опубл. 27.11.2016. Бюл. № 33. 12 с.
13. Горланов Е.С., Бажин В.Ю., Федоров С.Н. Карбо-термический синтез диборида титана: апгрейд // Журнал СФУ. Техника и технология. 2018. № 11. № 2. С. 156–166.

References

1. Leeuwen T.M. An Aluminum Revolution. Equity Research Report, Credit Suisse First Boston Corporation, June 22, 2000, 110 p.
2. Aluminium producers promise a cleaner smelting pot [Electronic resource]. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-05158-1>. (accessed: 20 January 2019).
3. Christini R. A., Dawless R. K., Ray S. P., Weirauch D. A. Advanced Anodes and Cathodes Utilized in Energy Efficient Aluminum Production Cells // Final Technical Progress Report for Phase III, Cooperative Agreement Number DE-FC07-98ID13666, 2001, no. 5, 92 p.
4. Bao Sh., Chai D., Shi Z., Wang J., Liang G., and Zhang Y. Effects of Current Density on Current Efficiency in Low



Temperature Electrolysis with Vertical Electrode Structure. *Light Metals*, 2018, pp. 611–619.

5. Jensen M. S., Pezzotta M., Zhang Z.L., Einarsrud M.-A., Grande T. Degradation of TiB₂ ceramics in liquid aluminum. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2008, vol. 28, pp. 3155–3164.

6. Saai A., Wang Z., Pezzotta M., Friis J., Ratvik A. P., and Vullum P. E. Multi-scale Modelling of Titanium Diboride Degradation Using Crystal Elasticity Model and Density Functional Theory. *Light Metals*, 2018, pp. 1329–1336.

7. Vetyukov M.M., Cyplakov A.M., Shkol'nikov S.N. *Metallurgiya alyuminiya i magniya* [Metallurgy of aluminium and magnesium]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1987, 320 p. (In Russ.).

8. Samsonov G.V., Serebryakova T.I., Neronov V.A. *Boridy* [Borides]. Moscow: Atomizdat Publ., 1975, 376 p. (In Russ.).

9. Wang Z., Friis J., Ratvik A.P. Transport of Sodium in TiB₂ Materials Investigated by a Laboratory Test and

DFT Calculations. *Light Metals*. 2018. P. 1321–1328.

10. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu. Nano- and the Microdimensional Coats Polycrystal Titanium-Containing the Bases a Method of Electrochemical Boronizing. *Smart Nanocomposites*. USA, Nova Science Publishers, Inc, 2016, vol. 7, no. 1, pp.75–88.

11. Gorlanov E.S. *Sposob polucheniya i podderzhaniya zashchitnogo smachivaemogo pokrytiya na uglerodistykh bloках katodnogo ustrojstva elektrolizyora dlya proizvodstva alyuminiya* [The method of obtaining and maintaining a protective wettable coating on cathode electrolyzer carbon blocks for aluminum production]. Patent RF, no. 2337184, 2008.

12. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Sman A.V. *Sposob polucheniya poroshka diborida titana* [Method of titanium diboride powder production]. Patent RF, no. 2016.

13. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. Carbothermic synthesis of titanium diboride: upgrade. *Tekhnika i tekhnologiya*, 2018, vol. 2, no. 11, pp. 156–166. (In Russ.).

Критерии авторства

Горланов Е.С. получил и оформил научные результаты, несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Gorlanov E.S. has obtained, formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Горланов Евгений Сергеевич,
кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
ООО «Эксперт-Ал»,
199106, г. Санкт-Петербург, просп. Средний В.О.,
86/17/36;
e-mail: gorlanove@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgeniy S. Gorlanov,
Cand. Sci. (Eng.),
Deputy General Director of Expert-AI LLC,
86/17/36 Sredniy pr. V.O., Saint-Petersburg 199106,
Russian Federation;
e-mail: gorlanove@yandex.ru



Обзор результатов исследований электролитического получения цинковых порошков из щелочных растворов

© С.В. Мамяченков*, С.А. Якорнов**, О.С. Анисимова***, Д.И. Блудова****

* ** ** ** *Уральский федеральный университет имени первого

Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

**ООО «УГМК-Холдинг», г. Верхняя Пышма, Россия

Резюме: Целью данной работы является формирование конкретных подходов и направлений области получения цинковых порошков с заданными свойствами из щелочных электролитов. Проанализированы результаты исследований множества авторов (86 источников) о влиянии различных условий электроэкстракции цинковых порошков из щелочных электролитов. До настоящего времени не получено всеобъемлющего теоретического объяснения механизма формирования порошка при электролизе цинка из щелочных растворов. Несмотря на множественность и разнообразие опубликованных данных, невозможно определить условия получения цинковых порошков с заданными свойствами из цинканных электролитов без собственных систематических исследований. Рассмотрены методы исследования электроосаждения цинка в растворах гидроксида натрия на катоде из нержавеющей стали методами циклической вольтамперометрии, хроноамперометрии и хронопотенциометрии. В условиях лабораторного электролиза изучено влияние состава электролита, концентрации примесей, плотности тока, температуры, введения присадок на выход по току и морфологию получаемых порошков. Выявлено, что среди авторов нет единого мнения о влиянии условий электролиза с точки зрения выхода по току и расхода электроэнергии. Установлено, что достоинствами электролиза щелочных цинканных растворов являются: высокая чистота получаемого металла, возможность получения порошков заданной крупности, хорошая прессуемость и спекаемость, возможность применения неапатостойких конструкционных материалов.

Ключевые слова: электроэкстракция, цинковые порошки, щелочные электролиты, плотность тока, выход по току, циклическая вольтамперометрия

Информация о статье: Дата поступления 15 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 18 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Мамяченков С.В., Якорнов С.А., Анисимова О.С., Блудова Д.И. Обзор результатов исследования электролитического получения цинковых порошков из щелочных растворов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 367–394. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-367-394.

Review of research results of zinc powder electrolytic production from alkaline solutions

Sergey V. Mamyachenkov, Sergey A. Yakornov, Olga S. Anisimova, Dana I. Bludova

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

UMMC-Holding LLC, Verkhaya Pyshma, Russian Federation

Abstract: The purpose of this work is to form specific approaches and directions in the field of producing zinc powders with desired properties from alkaline electrolytes. The analysis is given to the research results of many authors (86 sources) on the influence of various conditions of zinc powder electroextraction from alkaline electrolytes. Still there is no comprehensive theoretical explanation of the mechanism of powder formation in zinc electrolysis from alkaline solutions. Despite the multiplicity and diversity of published data, it is impossible to determine the production conditions of zinc powders with desired properties from zinc electrolytes without carrying on one's own systematic studies. Consideration is given to the research methods of zinc electrodeposition in the solutions of sodium hydroxide on the stainless steel cathode using cyclic voltamperometry, chronoamperometry and chronopotentiometry. In the conditions of laboratory electrolysis the influence of electrolyte composition, impurity concentration, current density, temperature, introduction of additives on the current output and morphology of the obtained powders is studied. It has been revealed that there is no consensus on the impact of electrolysis conditions in terms of current efficiency and power consumption among the authors. It is found out that the

advantages of the electrolysis of alkaline zincate solutions are: high purity of the resulting metal, possibility of obtaining the powders of the specified size, good compressibility and sintering, possibility of using non-acid-resistant structural materials.

Keywords: electroextraction, zinc powders, alkaline electrolytes, current density, current output, cyclic voltammetry

Information about the article: Received February 15, 2019; accepted for publication March 18, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Mamyachenkov S.V., Yakornov S.A., Anisimova O.S., Bludova D.I. Review of research results of zinc powder electrolytic production from alkaline solutions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 367–394. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-367-394.

Введение

В мире ежегодно образуется большое количество промышленных отходов, содержащих цинк, особенно в черной и цветной металлургии, металлообработке [1, 2]. Эти материалы обычно классифицируют как опасные из-за возможности выщелачивания токсичных элементов при длительном хранении. Вместе с тем, из-за достаточно высокой ценности цветных металлов, их рациональное использование привлекает все больший интерес.

Как правило, пирометаллургические процессы переработки цинкосодержащего сырья и промпродуктов сопряжены с проблемами образования дополнительных видов отходов, высоких капитальных затрат на оборудование и обеспечение экологической безопасности производства, а также достаточно высоким потреблением энергии и углеродистого топлива.

Гидрометаллургические процессы все чаще используют для извлечения металлов из техногенных отходов ввиду низкого потребления энергии и большей экологичности [3, 4]. Например, в публикациях [5, 6] представлены результаты разработки технологии сернокислотного выщелачивания, экстракции и электролиза для извлечения цинка из пыли электродуговой плавки (ЭДП).

В работе [7] исследовали влияние концентрации кислоты, температуры, продолжительности процесса и отношения Ж:Т на извлечение в раствор цинка и других металлов при сернокислотном выщелачивании пыли ЭДП. Извлечение цинка через 6 ч достигло почти 100%, а железа – 90% в 3 М растворе H_2SO_4 при 80°C и соотношении Ж:Т=5. В работе [8] достигнуты похожие результаты, хотя авторами не выяснен механизм перехода в раствор цинка из труднорастворимых соединений, например, ферритов. Остается открытым вопрос об эффективной сернокислотной технологии переработки пылей и промпродуктов медного производства.

Кроме того, кислотное выщелачивание цинкосодержащих материалов приводит к переводу в раствор большого количества примесей (особенно железа), выведение которых технологически затруднено и экономически затратно [9, 10].

Цель исследования

В последние годы проведен ряд исследований щелочного выщелачивания цинкосодержащих руд, концентратов и техногенных материалов [11–13]. В работе [14] показано, что извлечение цинка в 20% (6,25 моль/дм³) растворе гидроксида натрия при Ж:Т=80:1, температуре 100°C в течение 4 ч достигало 92%. При этом наблюдали практически полный переход в раствор свинца [13]. Наиболее рациональным методом выделения цинка из щелочных растворов является электроэкстракция.

Щелочное выщелачивание приобретает все большее значение, поскольку полностью исключается перевод в раствор ионов Fe, Cu, Cd и других примесей [15]. Однако такие примеси как Pb, Al и Sn растворяются и приводят к необходимости организации отдельных операций очистки щелочного электролита перед электроэкстракцией цинка. Требуют решения вопросы о минимальной концентрации этих примесей при электролизе и их влиянии на морфологию катодных осадков.



В работе [16] проведено исследование щелочного выщелачивания цинксодержащих пылей при различных условиях. Пыли богаты Zn, Cu, Cl, Pb и Al. Наиболее рационально выщелачивать их каустической содой, так как при сернокислотном выщелачивании и последующем электролизе не допускается присутствие в растворах даже минимальных количеств хлорид-ионов и более электроположительных, чем цинк, металлов [17].

Во время щелочного выщелачивания концентрация хлорида может быть увеличена до 25 г/дм³ без каких-либо проблем выделения газообразного хлора при электролизе [18]. Кроме того, большая часть меди (>90%) остается в твердой фазе. Выход по току 97–99% и достаточно низкий расход электроэнергии могут быть обеспечены даже при высоких плотностях тока [19].

Электролиз, как способ получения металлических порошков, получил широкое распространение для электроположительных металлов, например, меди. Менее распространен электролиз водных растворов для электроотрицательных металлов, так как в этом случае возрастают трудности осаждения и обработки металлических порошков [20].

Достоинствами электролиза щелочных цинкатных растворов для получения порошков являются [20, 21]:

- высокая чистота получаемого металла;
- хорошая прессуемость и спекаемость (при использовании порошков для получения компактных изделий);
- применимость для любого масштаба производства;
- возможность применения неокислостойких конструкционных материалов;
- возможность получения порошков заданной крупности.

Условиями, благоприятствующими отложению на катоде порошкообразного, легко удаляемого дисперсного осадка, являются [20–22]:

- оптимальная концентрация щелочи и ионов цинка в растворе;
- умеренная температура электролита;
- высокая плотность тока;
- высокая электропроводность электролита.

Регулируя эти условия, а также скорость циркуляции, с повышением которой уменьшается дисперсность порошка, можно получить продукт с желаемыми характеристиками. Однако единого мнения об оптимальных условиях щелочного электролиза цинка среди исследователей не сложилось.

В работе [23] предложен гидрометаллургический способ получения сверхтонкого порошка цинка из промышленных отходов различного состава, содержащих цинк. Этот процесс состоит из щелочного выщелачивания, стадии очистки и электролиза. Изучены влияющие на показатели процесса факторы, установлено, что при выщелачивании извлечение свинца и цинка в раствор превышает 80% и 90%.

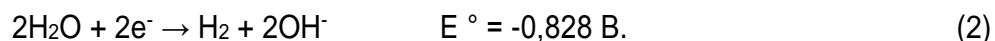
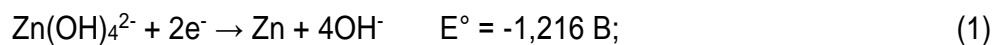
Материал и методы исследования

Электролиз в щелочных растворах, по сравнению с классическим электролизом, с точки зрения производительности и энергозатрат является более перспективным [24], он предполагает возможность повышения плотности тока выше 1000 А/м² и в то же время снижения потребления энергии до 1,75 кВт.ч/кг [25].

Для определения максимального увеличения производительности при сохранении приемлемого удельного энергопотребления, сопоставимого с фактическим промышленным процессом, необходимы данные по электроэкстракции цинка с высокой (2000–8000 А/м²) плотностью тока [19].

Результаты исследования и их обсуждение

1. Различные взгляды на механизм катодного осаждения цинка из щелочных растворов. При щелочном электроосаждении цинка на катоде протекает две основные реакции:



С точки зрения термодинамики первая реакция предпочтительнее, но на практике одновременно реализуется вторая реакция из-за значительного перенапряжения выделения водорода. Указанный потенциал E° справедлив для платинового катода, тогда как он значительно (на 0,4–0,6 В) выше для поверхности других металлов. Знание численных величин перенапряжения выделения водорода имеет большое значение в процессе осаждения цинка из щелочных растворов. При различных концентрациях NaOH потенциал цинкового катода выражается уравнением Тафеля:

$$\eta = a - b \cdot \lg i,$$

где a и b – константы.

Соответствующие данные в виде таблиц представлены в патенте [26]. Очевидно, что более высокие значения перенапряжения выделения водорода на цинке делает щелочные электролиты более подходящими с точки зрения выхода по току, чем кислые. Стоимость электроэнергии «кислотного» процесса составляет около 35% от стоимости производства цинкового порошка [27], в то время как щелочной процесс потребляет в среднем на 15–20% меньше энергии.

Электролиз щелочного цинкатного раствора можно рассматривать как процесс с разрядом на катоде комплексного иона цинка [28, 29]:



Равновесные потенциалы металлов в растворах их комплексных катионов обычно сдвинуты в сторону электроотрицательных значений, выделение металла протекает с меньшей скоростью по сравнению со скоростью разряда простого катиона [28].

Для цинка практическое использование имеют комплексные кислородные соединения типа Na_2ZnO_2 , NaHZnO_2 с анионом ZnO_2^{2-} . Образование комплексных анионов связано с потерей тех химических свойств, которые присущи катионам металлов, входящим в состав аниона, что влияет на величину электродных потенциалов. Для цинка в 1Н растворе ZnO_2^{2-} потенциал составляет -1,22 В (для сравнения – стандартный электродный потенциал восстановления иона Zn^{2+} составляет -0,76 В).

При электролизе растворов комплексных соединений наблюдается следующее:

- предельная сила тока достигается при плотности 10–20 А/м², тогда как для электролиза простых солей она составляет 500–800 А/м²;

- из исследований кинетики – скорость электрохимической реакции восстановления анионов с выделением металла заметно ниже скорости разряда катионов (для цинкатных растворов имеется в виду разряд катионов водорода: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$).

На механизм разряда комплексных ионов в истории изучения имели место разные точки зрения:

- восстановление металла из комплексного аниона атомарным водородом (не согласуется с данными термодинамики);



– вторичная диссоциация аниона, по типу:



не соответствует данным о потенциале восстановления, указанным выше; возможно проявление этого механизма в очень разбавленных растворах;

– непосредственный разряд комплексного иона, адсорбированного на катоде (в двойном слое).

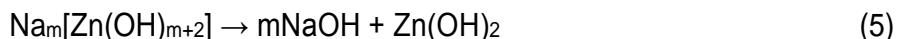
Последняя гипотеза (сформулированная Габером и Бодлендером, Глесстоном, в дальнейшем – А.Г. Ваграмяном и А.И. Левиным в 1950–1959 гг.) получила распространение как не противоречащая термодинамическим данным.

Анион Zn(OH)_4^{2-} или ZnO_2^{2-} представляет собой диполь, вследствие чего он адсорбируется катодом. В условиях катодной поляризации, сопровождающейся выходом электрона из катода, происходит деформация аниона. По достижении критической величины напряженности электрического поля следует разрыв аниона с присоединением атома Zn к кристаллической решетке или зародышу. Освободившиеся анионы OH^- , O^{2-} вытесняются под действием электрического поля, покидают двойной слой, освобождая место новым порциям комплексных анионов.

Очевидно, что сложный процесс разряда на катоде комплексных анионов протекает с существенно меньшей скоростью, чем простых катионов.

Большинство авторов, изучавших строение цинксодержащих частиц в щелочных растворах, считают, что эти частицы имеют комплексную ионную структуру: $[\text{Zn(OH)}_4]^{2-}$, $[\text{Zn(OH)}_3]^-$. При этом, чем выше концентрация щелочи, тем выше средняя отрицательная валентность комплексных ионов, хотя обычно присутствует их смесь [30].

При разбавлении водой или при длительной выдержке цинкаты очень медленно распадаются согласно схеме:



с образованием коллоидных частиц гидроксида цинка.

Исходя из этих представлений, авторы [31] считают, что при электролизе цинкатных растворов наряду с комплексными ионами разряжаются нейтральные частицы гидроксида цинка.

Возникновение губчатых осадков на отдельных точках катода связано, по их мнению, с недостатком частиц Zn(OH)_2 около таких точек. При общей значительной концентрации цинка в электролите губка на катоде образуется, когда гидроксид цинка восстанавливается на предельном токе. Медленное образование новых частиц Zn(OH)_2 при гидролизе приводит к тому, что на образование губки влияет объемная плотность тока; когда последняя велика, губка образуется значительно быстрее.

В работе [32] проведены исследования электроосаждения цинка в растворах гидроксида натрия на катоде из нержавеющей стали методами циклической вольтамперометрии (ЦВА), хроноамперометрии и хронопотенциометрии. На рис. 1 показаны полученные авторами кривые ЦВА разряда ионов $[\text{Zn(OH)}_4]^{2-}$ на электроде из нержавеющей стали при скорости развертки 20 мВ/с в щелочном электролите, содержащем 10 г/дм³ Zn и 20% (масс.) гидроксида натрия при 25°С. Резкое увеличение тока, связанное с зарождением кристаллов и ростом цинкового осадка, наблюдается при -1,56 В относительно хлорсеребряного электрода (ХСЭ). Затем следует спад, связанный с обеднением прикатодного слоя ионами $[\text{Zn(OH)}_4]^{2-}$.

При смещении потенциала в более отрицательную область, чем перенапряжение выделения водорода, появляется еще один пик увеличения тока за счет восстановления ионов водорода на катоде.

При развертывании потенциала в обратном направлении до -1,55 В, продолжается раз-

ряд ионов $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ вплоть до достижения анодных токов. Из вида кривой можно сделать вывод, что перенапряжение электроосаждения цинка в растворах гидроксида натрия на катоде из нержавеющей стали минимально.

Циклические кривые построены при различных скоростях развертки: 10, 30, 50, 70 и 90 мВ/с. С увеличением скорости развертки максимумы тока снижаются, поскольку увеличивается скорость разряда цинкат-ионов и можно предположить, что уменьшение тока обусловлено именно увеличением скорости развертки потенциала: более высокая скорость развертки приводит к ускорению реакции разряда $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ ионов. В связи с этим влияние диффузии ионов $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ также становится более значительным: если диффузия не может компенсировать потребление, ток будет уменьшаться из-за отсутствия $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ ионов вблизи поверхности катода. На рис. 2 показан график уменьшения максимума тока в зависимости от квадратного корня из потенциальной скорости развертки. Линейность зависимости указывает на то, что реакция контролируется массопереносом.

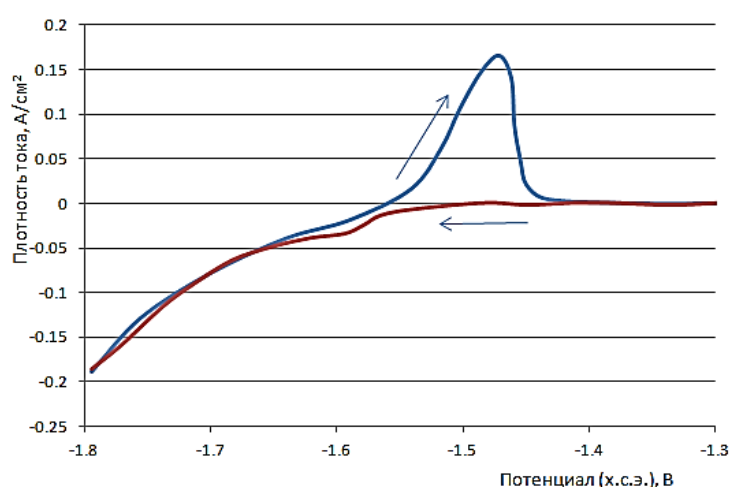


Рис. 1. Циклическая вольтамперограмма для катода из нержавеющей стали в щелочном растворе (10 г/дм³ Zn и 20% (масс.) NaOH) при 25°C. Скорость развертки 20 мВ / с [32]

Fig. 1. Cyclic voltammogram for the stainless steel cathode in the alkaline solution (10 g/dm³ of Zn and 20% (wt.) NaOH) at 25 °C. Sweep speed is 20 mV/s [32]

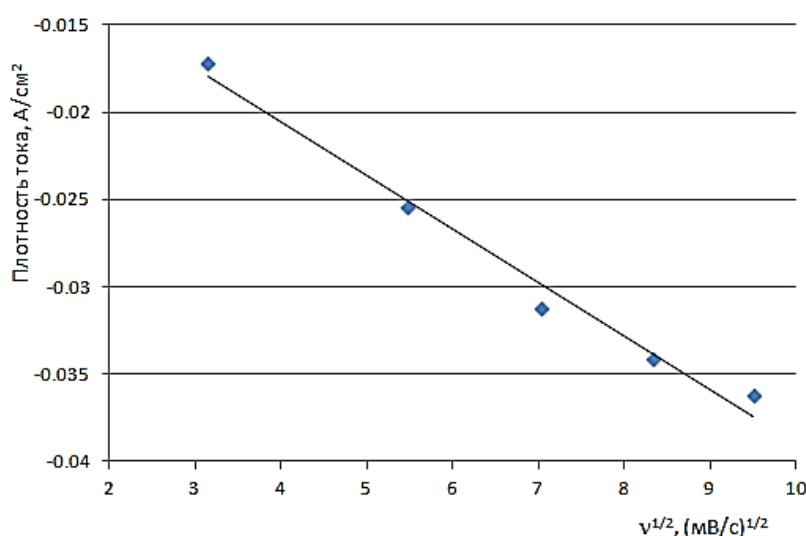


Рис. 2. Зависимость максимального катодного тока от квадратного корня скорости развертки [32]

Fig. 2. Dependence of the maximum cathode current on the square root of the sweep speed [32]



Автором [33] также утверждается, что в щелочном растворе ионы цинка существуют в виде $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$, однако формой, обнаруженной непосредственно на поверхности катода, является гидрат $\text{Zn}(\text{OH})_2$. Модификация $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ в гидратированный $\text{Zn}(\text{OH})_2$ происходит в процессе электроосаждения.

Поскольку потенциал зародышеобразования ионов цинка составляет около -1,56 В (относительно ХСЭ, рис. 1), потенциальный диапазон от -1,1 В до -1,8 В был выбран для анализа процесса нуклеации с помощью хроноамперометрии с интервалом 0,1 В. Из хроноамперограмм следует, что процесс разряда ионов цинка можно разделить на три стадии: первоначальную зарядку электрохимических двойных слоев, ионную диффузию из объема к поверхности катода, нуклеацию иона на катоде. При потенциале от -1,1 В до -1,4 В (ХСЭ), заряжаются электрохимические двойные слои и постоянный ток зарядки немного увеличивается (рис. 3 а). При потенциале -1,5 развиваются как диффузионные процессы, так и зародышеобразование.

Результаты [32] показали, что процесс зарядки электрохимического двойного слоя протекает слишком быстро, чтобы обнаружить пик на кривой тока в диапазоне от -1,46 В до -1,47 В. С увеличением потенциала от -1,50 до -1,56 В, очевидно, возникает ток нуклеации, и одновременно увеличивается устойчивый диффузионный ток, так как процесс зародышеобразования на поверхности катода поддерживается за счет диффузии ионов из объема раствора. С другой стороны, высокий отрицательный потенциал будет генерировать восстановление ионов водорода, следовательно, ток при потенциалах -1,7 В и -1,8 В вызван, в основном, восстановлением ионов водорода (рис. 3 б).

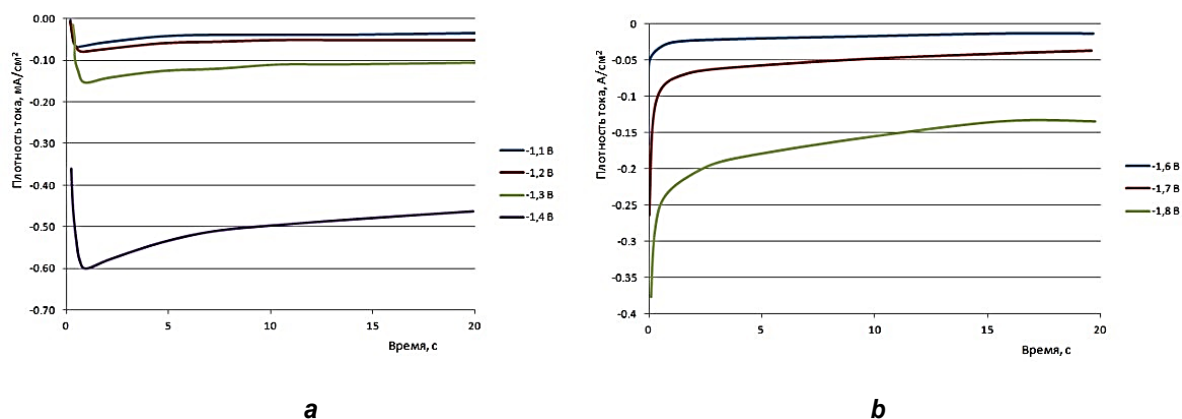


Рис. 3. Хроноамперометрические кривые при различных катодных потенциалах хлорсеребряного электрода [32]

Fig. 3. Chronoamperometric curves at different cathode potentials of the silver chloride electrode [32]

Коэффициент диффузии ионов $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$, характеризующий процесс массопереноса, может быть рассчитан из хронопотенциограмм. В работе [34] хронопотенциометрию проводили в электролите, содержащем 10 г/дм³ Zn при 25 мА/см², результаты представлены на рис. 4. Отрезок АВ на полученной кривой описывает скачок потенциала, связанный с омической поляризацией в момент замыкания цепи, отрезок ВС соответствует потенциалу, созданному электрохимической поляризацией, отрезок CD обусловлен концентрационной поляризацией и отрезок DE свидетельствует, что диффузия ионов из основной массы раствора не может обеспечить достаточное количество ионов для зародышеобразования на поверхности катода: потенциал стал более отрицательным, что привело к уменьшению концентрации ионов водорода.

Время стабилизации потенциала (τ) авторы [32] определили по хроноамперограмме продолжительностью 3,57 с (рис. 4), тогда коэффициент диффузии (D) ионов $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ может быть вычислен по уравнению:

$$\frac{i\sqrt{\tau}}{C^*} = 85,5nS\sqrt{D}, \quad (6)$$

где i – ток, мА; τ – время разряда, с; C^* – концентрация цинка в электролите, моль/дм³; n – число электронов, участвующих в электродной реакции; S – площадь электрода, см²; D – коэффициент диффузии ионов $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$, см²/с.

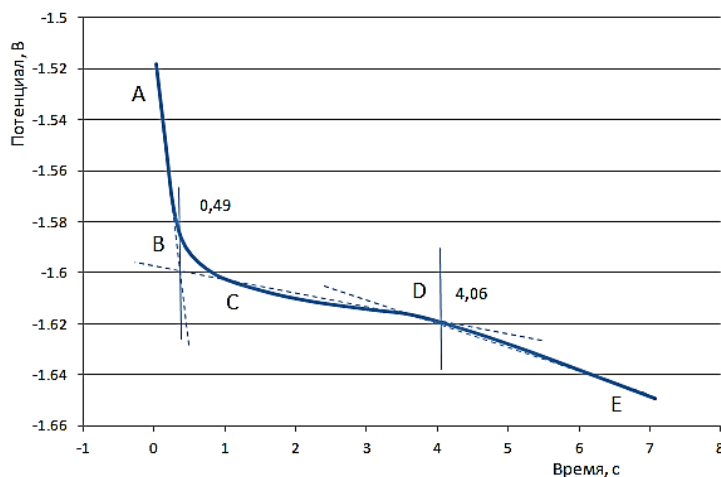


Рис. 4. Хронопотенциометрическая кривая при 10 г/дм³ Zn и 25 мА/см² [34]
 Fig. 4. Chronopotentiometric curve at 10 g/dm³ of Zn and 25 mA/cm² [34]

Рассчитанный коэффициент диффузии ионов $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ в растворе гидроксида натрия составил $3,22 \cdot 10^{-6}$ см²/с, по сравнению со значением $7,27 \cdot 10^{-6}$ см²/с в соляной кислоте [34], следовательно, ионы цинка диффундируют более трудно в растворе гидроксида натрия в основном за счет комплексообразования с OH- группами с образованием координированных ионов $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$.

На рис. 5 представлена полученная авторами [32] зависимость выхода по току цинка как функция времени электроэкстракции и плотности тока. Можно заметить, что при уменьшении плотности тока от 500 А/м² до 125 А/м² продолжительность электроэкстракции до максимальной текущей эффективности сократилась из-за ослабления влияния концентрационной поляризации. При 500 А/м² зародыши кристаллов цинка формируются быстро и локально, в результате чего кристаллических зародышей недостаточно для покрытия катода вначале электролиза. Выделение газообразного водорода происходит на кристаллах цинка и нержавеющей стали одновременно, что является причиной низкой эффективности, выход по току не превышает 45%. Через некоторое время диффузия ионов обеспечивает зарождение и рост частиц на катоде.

В результате площадь нержавеющей стали, на которой выделение водорода легче, чем на металлическом цинке, сокращается. Следовательно, меньше энергии тратится на выделение водорода, и эффективность тока повышается. Например, она составляет около 80% при продолжительности электролиза 120 мин (рис. 5). Кроме того, при более низкой плотности тока (375 А/м²) аналогичное значение эффективности тока (80%) авторы [32] получили в течение более короткого времени реакции (80 мин), что указывает на большую площадь зародышей цинка на катоде. Тот же вывод можно получить из эксперимента, проведенного ими при 250 А/м², в котором эффективность тока достигла максимума (около 90%) в течение 50 мин. При 125 А/м² выход по току достигает максимума 100%, что подтверждает гипотезу локального кристаллообразования.

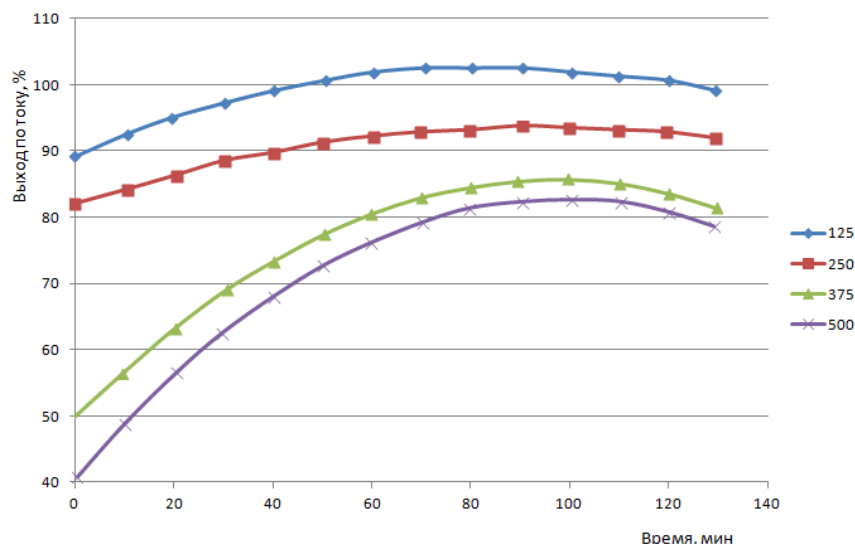


Рис. 5. Выход по току цинка при различных плотностях тока, А/м².
Концентрация цинка 10 г/дм³ [32]
Fig. 5. Zinc current output at various densities of current, A/m².
Zinc concentration 10 g/dm³ [32]

В режиме концентрационной поляризации, когда градиент концентрации достигает максимума, скорость диффузии является самой большой, тогда плотность диффузионного тока соответствует предельной плотности тока диффузии стационарного состояния. Эта предельная плотность диффузионного тока (j_d) может быть вычислена из следующего уравнения:

$$j_d = nFD \frac{c^b}{\delta}, \quad (7)$$

где n – число электронов, участвующих в электродной реакции; F – константа Фарадея, Кл/моль; D – коэффициент диффузии, см²/с; c^b – объемная концентрация цинка, моль/дм³; δ – толщина диффузионного слоя, см.

Расчетная предельная диффузионная плотность тока оказалась равной 95,7 А/м² для 500 А/м² в электролите, содержащем 100 г/дм³ Zn [15, 35, 36]. Предположительно, предельная диффузионная плотность тока зависит от концентрации цинка. Из рис. 5 следует, что самый высокий выход по току и кратчайшее время достижения максимума, который соответствует предельной диффузионной плотности тока, реализуется при плотности тока 125 А/м². Отсюда следует, что к предельной плотности тока диффузии следует стремиться при электролизе для повышения выхода по току и снижения потерь энергии. Естественно, практический рабочий ток может быть выше, чем предельный ток диффузии, так как рост зародышей цинка приводит к увеличению площади поверхности катода.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что электроосаждение цинка из электролита, содержащего 10 г/дм³ Zn и 20% масс. гидроксида натрия на катоде из нержавеющей стали контролируется массопереносом, и для ионов $[Zn(OH)_4]^{2-}$ коэффициент диффузии определен равным $3,22 \cdot 10^{-6}$ см²/с.

Таким образом, в исследованной системе концентрационная поляризация является лимитирующей стадией. При этом самый высокий выход по току и короткое время достижения максимума реализуются при плотности тока 125 А/м², который соответствует плотности предельного тока диффузии (около 95,7 А/м²).

Для описания кинетики электродных реакций при электролизе цинка в щелочных растворах в работе [37] использовано уравнение Бутлера-Вольмера:

$$i_{loc} = i_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right], \quad (8)$$

где i_{loc} – локальная плотность тока на границе «электрод-электролит»; i_0 – плотность тока обмена; α_a – коэффициент переноса анодной реакции; α_c – коэффициент переноса катодной реакции; F/RT – фактор Нернста, и η – активационное перенапряжение для электродных реакций, которое может быть определено как:

$$\eta = \phi_s - \phi_l - E_{eq}, \quad (9)$$

где ϕ_s – электродный потенциал, и ϕ_l – потенциал электролита. Согласно уравнению Нернста, равновесные потенциалы E^{eq} вычисляются как:

$$E_{(Zn^{2+}/Zn)}^{eq} = E_{(Zn^{2+}/Zn)}^0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{C_{Zn}}{C_{Zn^{2+}}}, \quad (10)$$

$$E_{(OH^-/O_2)}^{eq} = E_{(OH^-/O_2)}^0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{\sqrt{[C_{O_2}]}}{[C_{OH^-}]^2}. \quad (11)$$

Известно, что транспорт ионов в электролите находится под контролем диффузии, миграции и конвекции. Диффузия определяется разностью концентраций, миграция – дополнительной силой воздействия электрического поля, конвекция зависит от динамики движения электролита в ячейке.

Очевидно, что площадь электродов будет изменяться в ходе осаждения цинка. Молярный поток цинка N_{Zn} (моль/м²·с) через электрод может быть описан законом Фарадея в соответствии с уравнением:

$$N_{Zn} = - \frac{\nu_{Zn} i_{loc}}{nF}, \quad (12)$$

где стехиометрические коэффициенты для цинка (ν_{Zn}) равны 1 для обеих электродных реакций, а число электронов $n = 2$.

Скорость осаждения ν_{dep} (м/с), в направлении, нормальном к поверхности катода, может быть выведена из молярного потока, плотности и молярной массы цинка:

$$\nu_{dep} = \frac{M_{Zn} N_{Zn}}{\rho_{Zn}}. \quad (13)$$

Выше было показано, что осаждение металлов при плотностях тока, превышающих некоторое критическое значение, приводит к образованию порошкообразных отложений, причем при плотности тока, близкой к критической, наблюдается индукционный период, в ходе которого формируется компактный осадок. Установлено, что при других постоянных условиях произведе-



дение плотности тока на квадратный корень от времени начала формирования порошка является постоянной величиной. Это указывает на то, что образование порошка определяется медленным переносом ионов в объеме раствора.

Порошки образуются при больших перенапряжениях, по сравнению с некоторым критическим значением η_c , соответствующим предельному диффузионному току. Поэтому образование металлического порошка ускоряется за счет:

- уменьшения концентрации ионов в прикатодном пространстве;
- уменьшения концентрации электролита по разряжающимся ионам;
- увеличения вязкости раствора;
- снижения температуры;
- уменьшения скорости движения раствора.

До настоящего времени всеобъемлющего теоретического объяснения механизма формирования порошка при электроосаждении цинка из щелочных растворов не получено. Рост частиц порошка, вероятно, определяется теми же законами, что и усиление шероховатости поверхности, и рост дендритов при электролизе кислых растворов (например, медных сульфатных).

В первом приближении процесс электроосаждения цинка из щелочных растворов включает в себя три этапа: транспорта ионов к поверхности катода, электрохимической реакции и электрокристаллизации, включающей, в свою очередь, перенос заряда и включение атомов цинка в кристаллическую решетку металла.

Рост кристаллов на катодной поверхности в основном контролируется кинетикой процессов диффузии, зарождения и роста кристаллов в пространстве и времени. Морфология электролитического цинка является результатом баланса процессов роста осадка в плоскости, параллельной катоду (контролируется диффузией) и переноса вещества между атомными слоями, обусловленного кинетическими закономерностями (определяют равномерность роста осадка в вертикальном катоду направлении). Заключительная морфология зависит от конкуренции между вертикальным и горизонтальным ростом кристаллических плоскостей [38].

Неравномерный рост кристаллов осажденного цинка может быть вызван кристаллическими дефектами, такими как точечные дефекты, краевые и винтовые дислокации и кристаллические кластеры [39]. Закономерности кристаллизации при электроосаждении цинка в работе [40] смоделированы с помощью кинетического метода Монте-Карло, в котором предполагается, что число атомов цинка в каждом слое осадка неодинаково и постепенно уменьшается в связи с несоответствием энергии атомов цинка и сил Ван-дер-Ваальса (перенапряжений) в различных дислокациях, что приводит к изменениям структуры катодного осадка.

Рост дендритов также контролируется диффузией и является причиной морфологических изменений, которые могут быть описаны с помощью метода ограниченной диффузией агрегации, как показали авторы [41]. Многие исследователи описали закономерности образования дендритных катодных осадков цинка на основе фрактальной теории [42, 43].

Интенсивность формирования и роста дендритов изменяется с перенапряжением осаждения; дендриты не образуются при перенапряжениях меньше некоторого значения η_i . Увеличение перенапряжения приводит к увеличению выхода дендритных частиц, вплоть до значения η_c , при котором компактный металл не формируется и рост дендритов начинается без индукционного времени (критическое перенапряжение образования порошка).

Для процесса электрокристаллизации цинка из щелочных растворов значения η_i и η_c получены экстраполяцией линейных зависимостей « $1/t_i - \eta$ » до нулевой высоты. Предполагается, что время индукции роста дендритов может быть определено как время, при котором плотность тока на острие дендрита становится равной предельной плотности тока на массивном образовании той же высоты внутри диффузионного слоя.

Авторы работ [44, 45] утверждают, что величина η_i может быть определена из « $I - t$ » зависимостей на основе анализа механизма роста катодного осадка цинка. Предельный ток

диффузии I при росте поверхности шероховатости недендритного характера определяется формулой:

$$I = S\Theta \frac{nFDC_0}{\delta} + \frac{S(1-\Theta)}{N} j = \sum_{j=1}^{j=N} \frac{nFDC_0}{\delta - h_i}, \quad (14)$$

где S – площадь электрода, м^2 ; F – число Фарадея 96500 Кл/моль; n – число электронов; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; C_0 – объемная концентрация, моль; δ – толщина диффузионного слоя, м; Θ – доля плоской поверхности; N – количество активных центров; h_i – начальная высота для роста дендрита, м.

Высота каждого выступа h_i внутри диффузионного слоя увеличивается в соответствии с выражением:

$$h_i = h_{0i} \exp\left(\frac{VDC_0 t}{\delta^2}\right), \quad (15)$$

где h_{0i} – начальная высота дендрита, м; V – молярный объем; t – время, мин.

Перенапряжение (η) и плотность тока (i_d) на кончике дендритов [46] связаны соотношениями:

$$i_d = i_0 \frac{C_d}{C_0} \exp\left(\frac{\eta - \Delta\eta}{\eta_0}\right); \quad (16)$$

$$\Delta\eta = \frac{2\gamma\mathcal{V}}{nFr}, \quad (17)$$

где i_0 – плотность тока обмена, $\text{А}/\text{м}^2$; C_d – концентрация на вершине дендрита, моль; η – перенапряжение, В; η_0 – перенапряжение образования порошка, В; γ – поверхностное натяжение, Н/м; r – радиус кончика дендрита, м.

При достаточно низких значениях i_0 существует высокая вероятность появления активных центров с радиусом в требуемом диапазоне для роста дендритов. Авторы [44] показали, что если процесс контролируется диффузией, то при любом перенапряжении в стационарном состоянии и достаточно высоком i_0 плотность тока описывается уравнением:

$$i = \frac{(nF)^2 DC_0}{RT\delta} \eta, \quad (18)$$

а плотность тока на кончике дендрита равна:

$$i_d = \frac{(nF)^3 DC_0}{8\gamma RT\delta} \eta^2. \quad (19)$$

Для $i=i_d$ в этом случае:



$$\eta_0 = \frac{8\gamma V}{nFh_0} \quad (20)$$

Значение минимального перенапряжения, при котором возможен рост дендритов, можно оценить следующим образом. Для $\delta > h$ изменение механизма роста произойдет, если

$$\frac{nFDC_0}{\delta - h} = i_0 \frac{h}{\delta} \exp\left(\frac{\eta - \Delta\eta}{\eta_0}\right) \quad (21)$$

для смешанного контроля и

$$\frac{(nF)^2 DC_0}{RT(\delta - h)} \eta = \frac{(nF)^3 DC_0 h}{8\gamma RT \delta V} \eta^2 \quad (22)$$

для диффузионного контроля.

2. Выбор оптимальных условий электролиза (с точки зрения выхода по току) и расхода электроэнергии. Расход электроэнергии при щелочном электролизе при плотности тока 1000 A/m^2 составляет около $1,75 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$, по сравнению с $3,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$ при 500 A/m^2 в классическом промышленном процессе, использующем кислые сульфатные электролиты [35, 36].

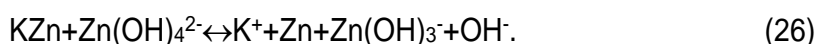
При всех значениях плотности тока и концентрации цинка выход по току линейно уменьшается при увеличении концентрации KOH в электролите. Авторами [47] предложен следующий, маловероятный, с нашей точки зрения, механизм выделения водорода при электролизе щелочных (на основе KOH) цинкатоных растворов:



При этом в реакции (24) авторами не выдержан ни материальный, ни электронный баланс.

Утверждается, что при увеличении концентрации щелочи повышается концентрация ионов калия и равновесие реакции (21) сдвигается вправо. В результате выделение водорода будет усиливаться в соответствии с реакциями (24) и (25), что приводит к снижению выхода по току цинка. Тот же механизм обосновывается в работе [48].

Для всех плотностей тока и концентраций щелочи выход по току линейно увеличивается с ростом концентрации цинка в электролите, что, предположительно, связано с протеканием, наряду с реакцией (23), следующего взаимодействия:



Заметим, что и в реакции (26) электронный баланс авторами не соблюдается.

При этом делается вывод, что при увеличении концентрации цинкато-ионов и их взаимодействии с KZn выделение водорода подавляется и, следовательно, повышается выход по току. Наибольший выход по току достигается при следующих условиях: 3500 A/m^2 , $1,2 \text{ M Zn}$ и 7 M KOH . Увеличение плотности тока выше 3500 A/m^2 приводит к значительным потерям энергии за счет нагрева электролита.

Образование псевдосплава KZn в щелочном электролите (реакции 23 и 26) представляется нам весьма сомнительным, т.к. термодинамически потенциал калия значительно отрицательнее, чем потенциал цинка и существование калия в виде металлической фазы в водном растворе невозможно.

В работах [35, 49] представлены различные подходы к снижению стоимости производства цинка электролизом, в том числе с использованием щелочных электролитов. Концентрация цинка в растворе во всех опытах составляла 60 г/дм³ (0,92 M ZnO), поскольку выход по току возрастает с увеличением концентрации цинка. Концентрация гидроксида натрия была зафиксирована на уровне 300 г/дм³ (7,5 M NaOH), но были исследованы и другие концентрации (350, 400, 450 и 500 г/дм³) с целью изучения влияния этого фактора. Изучали влияние меди (50, 100 и 200 мг/дм³) и мышьяка (1, 3, 5, 25, 50 и 100 мг/дм³), которые присутствуют в щелочных растворах после выщелачивания различных материалов.

Некоторые из исследованных переменных здесь не показали значительного влияния на электрохимические характеристики. Выход по току был близок к 100% независимо от концентрации гидроксида натрия, плотности тока или температуры. Выход по току резко снижается в присутствии в щелочном электролите мышьяка (до 78% при 100 мг/дм³ As) (рис. 6). В случае, когда выход по току составляет 100%, расход электроэнергии прямо пропорционален напряжению на ячейке.

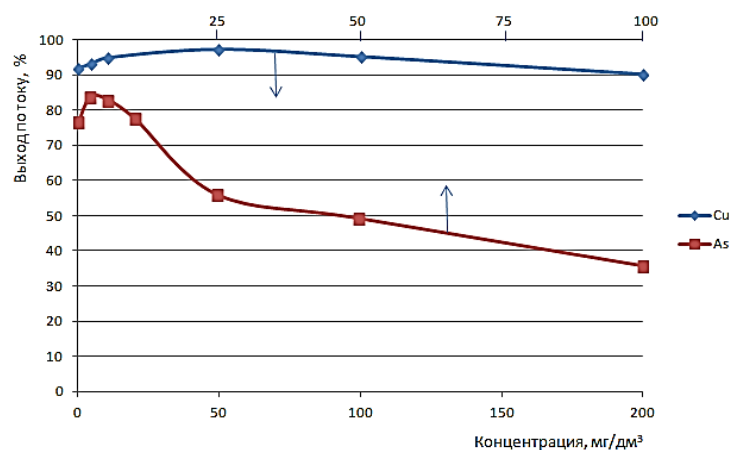


Рис. 6. Влияние концентрации меди и мышьяка в растворе на выход по току (электролит, г/дм³: 60 Zn, 300 NaOH, 1000 А/м², 40°С, 2 ч) [49]

Fig. 6. Effect of copper and arsenic concentration in the solution on current output (electrolyte, g/dm³: 60 Zn, 300 NaOH, 1000 A/m², 40 °C, 2 hours) [49]

Как видно на рис. 7, напряжение на ячейке увеличилось с 2,0 до 3,0 В при увеличении плотности тока с 50 до 1000 А/м² в стационарном состоянии, которое достигается приблизительно через 90 мин.

Рис. 8 показывает зависимость напряжения на ячейке в стационарном режиме от температуры. Напряжение на электролизере снизилось с 3,2 до 2,65 В при повышении температуры с 24 до 74°С. Кажущаяся плотность осадка также уменьшается с температурой, что означает, что катодный осадок становится более пористым.

Для всех катодов, за исключением магния, было заметно выделение водорода, которое особенно видно в начале электролиза, пока вся активная поверхность не покрыта цинком.

В суммарном расходе электроэнергии (РЭЭ) на процесс щелочного электролиза значительную долю занимает омическое сопротивление электролита. Проводимость указанного выше состава раствора гидроксида натрия составляет при 40°С 0,29 Ом⁻¹·см⁻¹ (рис. 9). Поскольку расстояние между электродами составляет 4 см, омическое падение напряжения равно 1,38 В при 1000 А/м².

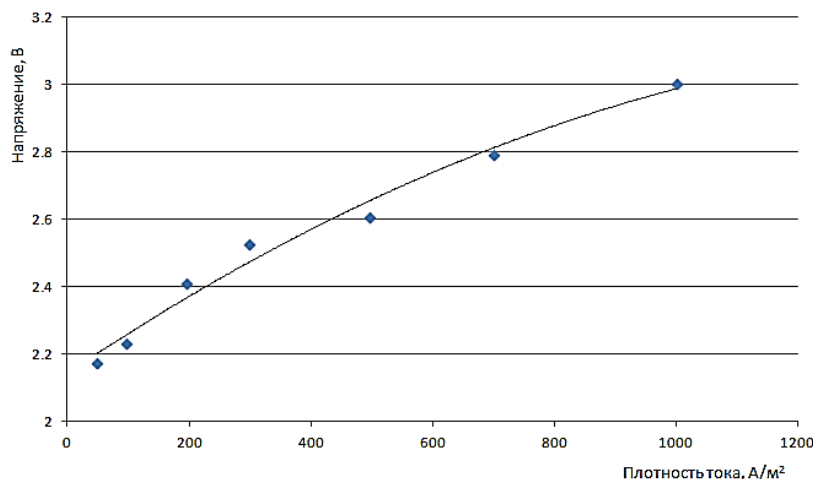


Рис. 7. Влияние плотности тока на напряжение на ячейке
(электролит, г/дм³: 60 Zn, 300 NaOH, 40°C, 2 ч) [49]

Fig. 7. Effect of current density on cell voltage
(electrolyte, g/dm³: 60 Zn, 300 NaOH, 40 °C, 2 hours) [49]

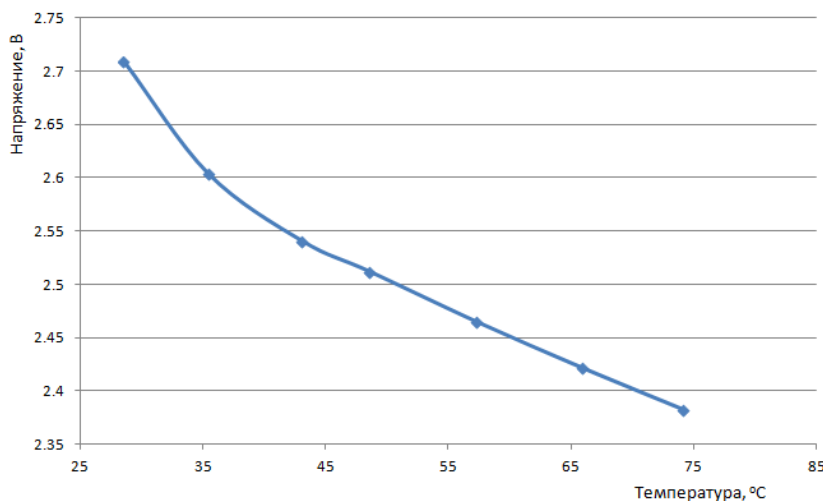


Рис. 8. Влияние температуры на напряжение на ячейке
(электролит, г/дм³: 60 Zn, 300 NaOH, 1000 А/м², 2 ч) [49]

Fig. 8. Effect of temperature on cell voltage
(electrolyte, g/dm³: 60 Zn, 300 NaOH, 1000 A/m², 2 hours) [49]

Можно уменьшить омическое падение напряжения в электролите за счет повышения температуры, так как происходит увеличение проводимости раствора (рис. 10). Следовательно, происходит снижение напряжения на ячейке и уменьшение РЭЭ с 2,62 кВт·ч/кг при 24°C до 2,17 кВт·ч/кг при 74°C. При температурах выше 89°C, как было показано авторами [39, 47, 48], возможно обратное растворение цинка.

Омическое падение может быть дополнительно уменьшено за счет снижения расстояния между электродами. Экспериментально показано, что расстояние 2,5 см вместо 4 уменьшает расход электроэнергии до 1,93 кВт·ч/кг (1000 А/м², 40°C). Цинковый порошок легко осыпается с поверхности катода (особенно полированного магниевого) и при минимальном механическом воздействии может быть удален через дно электролизной ванны. Это позволяет минимизировать расстояние между электродами, поскольку в ходе процесса оно остается практически постоянным.

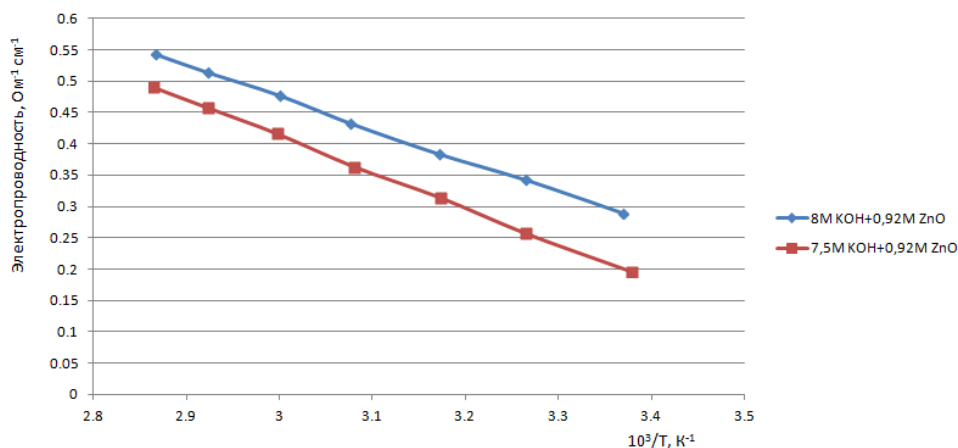


Рис. 9. Температурная зависимость электропроводности щелочных электролитов в Аррениусовских координатах
Fig. 9. Temperature dependence of electrical conductivity of alkaline electrolytes in Arrhenius coordinates

Термодинамика этой системы говорит о преимуществе выделения водорода над кристаллизацией цинка. Однако, поскольку перенапряжение водорода на цинке очень велико (и еще больше на магнии), а перенапряжение цинка сравнительно низкое, выделение водорода на катоде практически исключено.

Порошкообразные отложения, которые образуются на магниевом катоде, позволяют использовать большие плотности тока для электролиза без значительного снижения выхода по току. Например, чтобы избежать значительного выделения водорода при 8000 A/m^2 , дендритный осадок должен обеспечивать увеличение площади поверхности, достаточное для уменьшения плотности тока до предельного значения. Учитывая предельную плотность тока электроосаждения цинка, равную 497 A/m^2 , увеличение площади поверхности должно быть больше 16 раз (т.е. $8000/497=16,1$). Реальные катодные осадки цинка дают увеличение поверхности в 20–25 раз, что объясняет тот факт, что при высоких плотностях тока выход по току близок к 100%.

Даже при 8000 A/m^2 удельный расход энергии составляет $2,5 \text{ кВт.ч/кг}$, что гораздо ниже, чем расход при «кислотном» электролизе ($3,1 \text{ кВт.ч/кг}$ при 500 A/m^2). Это обеспечивает возможность увеличения производительности процесса в 15–16 раз. При этом в случае высокой плотности тока следует учитывать некоторые проблемы: короткие замыкания за счет быстрого роста дендритов, избыток тепла, создаваемый омическим падением напряжения в растворе, шинах и контактах. Кроме того, необходимы такие дополнительные операции как отмывка и сушка порошкообразного цинка и (при необходимости) его доизмельчение, однако эти операции заметно не повлияют на общую энергоемкость процесса [35, 49].

3. Влияние условий электролиза на морфологию цинковых порошков. Образование порошков цинка разной морфологии при катодном осаждении в щелочной среде до сих пор полностью не объяснено. Среди методов, которые были использованы для изменения и контроля этой морфологии: импульсный, переменный, реверсивный ток, ультразвук, неорганические и органические добавки, материал катода, наложение магнитного поля и др. [50–54].

Сокращение размера зерна электролитического цинкового порошка является важной задачей, поскольку ультрадисперсный порошок проявляет высокую реакционную способность, например, при контактном вытеснении примесей электроположительных металлов из растворов (цементации) [50, 51]. В настоящее время для повышения активности цинковых порошков используют процесс измельчения, который увеличивает энергетические затраты, или применяют при электроэкстракции органические добавки – поверхностно-активные вещества (ПАВ) для улучшения структуры частиц, что усложняет контроль за процессом электроэкстракции [52–54].



Очевидно, что морфология цинковых осадков, полученных в щелочных растворах при высоких плотностях постоянного тока, зависит в том числе от подложки и продолжительности электролиза. Благодаря высокой удельной площади поверхности, реальная плотность тока уменьшается. Например, при плотностях тока в диапазоне от 1000 до 5000 А/м² [35, 36] увеличение площади поверхности составляло от 20 до 25 раз.

На магниевом катоде компактных осадков не образуется и появляется только смесь порошкообразных структур, которые легко отделяются от поверхности электрода, поэтому процесс может быть автоматизирован.

При электролизе щелочных цинкатных растворов выход губчатого цинка по току растет с увеличением концентрации цинка и уменьшением концентрации щелочи в электролите, с повышением температуры и усилением перемешивания, вплоть до плотностей тока 3000–4000 А/м².

Повышению дисперсности цинковых порошков, получаемых из цинкатных растворов, способствует добавление в электролит незначительного количества чужеродных ионов, например, меди до 20 мг/дм³. Образование мелкозернистого губчатого осадка прогрессирует по мере повышения концентрации меди в растворах и снижения плотности тока [55].

Мышьяк (в количестве 0,0001 %) благоприятствует образованию черных рыхлых осадков и одновременно способствует образованию дендритной структуры частиц цинка. По мере возрастания концентрации мышьяка увеличивается способность к образованию ветвистых осадков.

По данным Н.Т. Кудрявцева, добавки незначительных количества солей свинца, олова и ртути вообще устраняют образование губки в цинкатных растворах.

Исследованы также эффекты добавления неорганических соединений, таких как ZnO, V₂O₅, PbO, HgO, Sb₂O₃, TiO₂ и Pb₃O₄ [56–58]. Единого мнения о влиянии условий электролиза на морфологию и размер частиц катодного осадка цинка до настоящего времени не существует. Форма частиц порошка, полученного в разных условиях, изучается чаще визуальными методами микроскопии, данные об условиях получения определенных форм противоречивы [59].

Достоинством электролитического метода получения дендритных осадков металла является возможность влиять на динамику роста и структуру частиц, изменяя состав раствора, величину тока или потенциала, режим поляризации. В промышленности порошкообразные осадки получают в условиях поляризации постоянным током, превышающим величину предельного диффузионного тока. Количественное описание процесса электрокристаллизации дендритов металлов с помощью модельных представлений позволяет обоснованно выбирать условия получения порошкообразных осадков с заданными свойствами.

Для выбора условий получения высокодисперсных порошков цинка в щелочных электролитах в работах [60, 61] был проведен расчет структурных свойств растущего дендритного осадка: радиуса вершин ветвей дендритов r_v и плотности их размещения на фронте роста осадка N_s с помощью модельных представлений.

Анализ экспериментальных и литературных данных позволил авторам предположить, что изменение длины дендритов во времени (t) с высокой степенью точности может быть описано экспоненциальной зависимостью

$$y(t) = y_0 \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right), \quad (27)$$

где y_0 и τ – эмпирические параметры.

При получении дендритных осадков кристаллизация металла протекает, преимущественно, на вершинах дендритов, образующих фронт роста осадка. Плотность тока на вершинах может быть рассчитана по уравнению смешанной кинетики:

$$\frac{1}{i_B} = \frac{1}{i_{кин}} + \frac{1}{i_{диф}}. \quad (28)$$

При высокой катодной поляризации кинетический ток ($i_{кин}$) гораздо больше, чем диффузионный ($i_{диф}$), поэтому в уравнении первым слагаемым можно пренебречь. Тогда для плотности тока на вершинах дендритов можно записать:

$$i_B(t) = i_{диф}(t) = \frac{zFDc_0}{r_B(t)}, \quad (29)$$

где D – коэффициент диффузии ионов цинка, c_0 – концентрация ионов цинка в растворе.

В соответствии с законом Фарадея, скорость удлинения осадка пропорциональна плотности тока на вершинах:

$$i_B(t) = \frac{dy}{dt} \frac{zF}{v_{Me}}, \quad (30)$$

где $v_{Me} = A_{Me}/\rho_{Me}$ – мольный объем металла. Совместное решение двух последних уравнений и дифференцирование зависимости длины дендритов от времени позволяет рассчитать радиус вершин:

$$r_B(t) = \frac{Dc_0v_{Me}\tau}{y_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}. \quad (31)$$

На восстановление металла идет часть тока, определяемая величиной мгновенного выхода по току ($Bm(t)$):

$$I \cdot Bm(t) = i_B 2\pi r_B^2 \cdot N \cdot \pi(D_0 + 2y) \cdot H. \quad (32)$$

Из этого уравнения, с учетом предыдущих равенств, получаем выражение для расчета плотности расположения вершин на фронте роста:

$$N = \frac{I \cdot Bm(t) \cdot \frac{v_{Me}}{zF}}{r_B^2 \cdot \frac{y_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdot 2\pi^2(d_0 + 2y(t)) \cdot H}. \quad (33)$$

Проведенные в [61] расчеты показали, что в процессе электролиза происходит увеличение радиуса вершин дендритов и уменьшение их числа. Увеличение коэффициента истощения (величины заданного тока) и уменьшение концентрации раствора способствует получению дендритов с малым радиусом вершин.

Высокопористый порошок цинка получают в присутствии различных органических добавок из 3-8 М щелочного раствора при плотности тока выше 12 А/дм² [62, 63]. Но основное влия-



яние на морфологию осадков, крупность получаемых электролитических порошков и показатели электролиза оказывают состав электролита, температура и, особенно, плотность тока.

Выделение газообразного водорода на катоде существенно влияет на морфологию порошка. На первых этапах осаждения, когда зона реакции осаждения цинка мала, высвобождение пузырьков водорода вызывает образование многочисленных центров кристаллизации и дендритов, а также значительные колебания потенциала.

В исследовании [48] проведен анализ морфологических изменений катодного осадка в зависимости от условий щелочного электролиза. Три основных параметра были выбраны в качестве переменных: плотность тока (500, 1500, 2500 и 3500 А/м²), концентрация цинка (0,5, 0,8, и 1,1 М) и концентрация КОН (7,9 и 11 М). Температуру (25°С) и расстояние между электродами поддерживали постоянными. Катодом являлась цинковая пластина, анодом – никелевая.

Выход по току возрастает с увеличением плотности тока при всех концентрациях цинка и щелочи, хотя увеличение меньше при более высоких плотностях тока (выше 2500 А/м²). Очевидно, что перенапряжение осаждения цинка меньше, чем перенапряжение для выделения водорода, при всех плотностях тока, и осаждение цинка протекает легче, когда эта разность больше [64].

Для всех условий увеличение плотности тока изменяет форму порошка от плотной и одноосной до дендритной. При плотности тока выше 3500 А/м² никаких существенных изменений в морфологии и крупности осадка не происходит.

4. Влияние органических добавок. С 1960-х годов многочисленные усилия были сосредоточены на изучении и подавлении дендритного роста во время электроэкстракции цинка, особенно из кислых электролитов [43, 65–68].

Подавление шероховатости или роста дендритов при электроосаждении цинка также может быть достигнуто за счет использования добавок [69–73]. Сообщалось об использовании добавки полиэтиленгликоля (ПЭГ) для подавления роста дендритов при электроосаждении цинка из галогенидсодержащих кислых электролитов [74]. Исследовано также влияние добавки поливиниловых спиртов [75, 76], полиаминов [77] и карбонильных соединений [78]. Несмотря на то, что предложено и опробовано несколько перспективных добавок, систематическое исследование механизма, посредством которого эти добавки подавляют рост дендритов цинка, все еще отсутствует.

В работе [79] изучен полиэтилененимин (PEI) в качестве добавки для подавления роста дендритов при щелочной электроэкстракции цинка. PEI является широко изученным поляризатором при электроосаждении меди и также устойчив в щелочных средах.

При добавлении 10 ppm PEI к электролиту (0,1 М ZnO + 4,0 М КОН) рост дендритов был значительно подавлен (по сравнению с опытом без добавок). При концентрации PEI 50 ppm (и выше) рост дендритов был полностью устранен, и получены яркие электроосаждения цинка толщиной ~ 10 мкм. Эти наблюдения демонстрируют концентрационно-зависимую эффективность подавления роста дендритов от концентрации PEI при электроосаждении цинка в щелочных электролитах.

Сообщается [62], что пористый порошок цинка получают в присутствии различных органических добавок из 12 М раствора КОН и 4 масс. % ZnO при плотности тока 12 А/дм². Использовали анионные ПАВ, такие как додецилбензолсульфонат натрия и додецилсульфат натрия, уменьшающие размер зерна цинкового порошка. В других работах [48, 63] проведены исследования влияния на морфологию катодного осадка добавок органических кислот в растворе 8,5 М КОН, содержащем 25 г/дм³ ZnO. Установлено, что перенапряжение выделения водорода при образовании мелкодисперсного цинкового порошка значительно снижают винная, лимонная кислоты и их производные [63].

5. Импульсный электролиз. В процессе электроэкстракции цинка для контроля размера и морфологии получаемых порошков в последнее время широко применяются поверхностно-активные вещества [62], однако накопление этих добавок может привести к ухудшению

химического состава осадков. Проводится активный поиск других потенциальных методов для получения ультрадисперсных порошков цинка с однородным размером, например, импульсный электролиз [80–82]. Многие попытки контролировать морфологию электроосажденного цинка были основаны на оптимизации силы приложенного тока или его формы. Имеются результаты использования импульсного тока [83], высокочастотных импульсов прямоугольной формы [84] и моделирования влияния импульсного тока на морфологию катодных осадков цинка [85].

В работе [86] описан новый эффективный метод получения однородных и тонких порошков цинка с использованием импульсного режима подачи постоянного тока. Периоды подачи тока (τ_{on}) и его отключения (τ_{off}) варьировались от 5 до 25 мс при плотности тока в диапазоне 1500–1800 А/м². Исследования проводили с электролитами, содержащими 5 М NaOH, 35 г/дм³ Zn (таблица).

Результаты катодного осаждения цинка в режиме импульсного тока показали, что среднее напряжение на ячейке увеличилось с -2,9 В при $\tau_{on}=5$ мс до 3,2 В при $\tau_{on}=15-25$ мс, в то время как оно уменьшилось с -3,2 В при $\tau_{off}=5$ мс до -2,6 В при $\tau_{off}=20$ мс.

Увеличение τ_{on} от 5 до 25 мс приводит к снижению выхода по току вплоть до 58,8%, это связано, очевидно, со снижением потока диффузии цинка к катоду, что уменьшает скорость восстановления и, следовательно, выход по току. Наоборот, увеличение τ_{off} от 5 до 15 мс оказывает положительное влияние на выход по току, который достигает максимального значения (92,86%) при τ_{off} 15 мс. Дальнейшее увеличение продолжительности паузы снижает выход по току, что может быть связано с адсорбцией гидроксил-ионов OH⁻ на поверхности катода и блокировкой его активных участков.

Выход по току и расход электроэнергии в различных режимах импульсного электролиза [86]

Current output and power consumption in various modes of pulsed electrolysis [86]

	$\tau_{off} = 5$ мс				$\tau_{on} = 15$ мс			
τ_{on}	5	15	20	25				
τ_{off}					5	10	15	20
Выход по току, %	96,2	69,9	67,2	58,8	69,9	81,0	92,9	76,1
Расход электроэнергии, кВт.ч/кг	2,48	3,73	3,89	4,51	3,73	2,93	2,39	2,81

Важным практическим преимуществом импульсного электролиза является возможность управления свойствами порошкового осадка и улучшения его качества.

Электронные микрофотографии морфологии поверхности порошков цинка, полученные путем прямого и импульсного электролиза, показали, что оба они являются дендритными и очень пористыми, однако импульсные электролитические порошки цинка более однородны и имеют меньшие размеры. Интересно, что 90% электролитических порошков, полученных при обычном электролизе, имеют крупность около 235 мкм, в то время как 90% из порошков, полученных с использованием импульсного тока – менее 100 мкм.

Заключение

1. Электролиз, как способ получения металлических порошков, получил достаточно широкое распространение. Достоинствами электролиза щелочных цинканных растворов являются: высокая чистота получаемого металла, возможность получения порошков заданной крупности, хорошая прессуемость и спекаемость, возможность применения некислотостойких конструкционных материалов.

2. Условиями, благоприятствующими отложению на катоде порошкообразного, легко удаляемого дисперсного осадка, являются: оптимальная концентрация щелочи и ионов цинка



в растворе, умеренная температура электролита, высокая плотность тока.

Регулируя эти условия, можно получить продукт с желаемыми характеристиками. Однако единого мнения об оптимальных условиях электроосаждения цинка из щелочных электролитов среди исследователей не сложилось.

3. На механизм разряда комплексных цинкатных ионов в истории изучения имели место разные точки зрения:

- восстановление металла из комплексного аниона атомарным водородом (не согласуется с данными термодинамики);

- вторичная диссоциация комплексного аниона на катион цинка и гидроксильные группы, что не соответствует данным о потенциале восстановления;

- непосредственный разряд комплексного иона, адсорбированного на катоде в двойном слое;

- некоторые авторы считают, что при электролизе цинкатных растворов наряду с комплексными ионами разряжаются нейтральные частицы гидроксида цинка. Единого мнения о природе разряжающихся частиц не выработано.

4. До настоящего времени не получено всеобъемлющего теоретического объяснения механизма формирования порошка при электроосаждении цинка из щелочных растворов. Данный процесс включает в себя три этапа: транспорт ионов к поверхности катода, электрохимическую реакцию и электрокристаллизацию, включающую, в свою очередь, перенос заряда и включение адатомов цинка в кристаллическую решетку металла. Рост кристаллов на катодной поверхности в основном контролируется кинетикой процессов диффузии, зарождения и роста кристаллов в пространстве и времени. Морфология электролитического цинка является результатом баланса процессов роста осадка в плоскости, параллельной катоду (контролируется диффузией), и переносом вещества между атомными слоями. Заключительная морфология зависит от конкуренции между вертикальным и горизонтальным ростом кристаллических плоскостей.

5. Нет единого мнения о влиянии условий электролиза с точки зрения выхода по току и расхода электроэнергии. Концентрация цинка в растворе в различных опытах составляла от 20 до 60 г/дм³ (0,92 М ZnO), выход по току возрастает с увеличением концентрации цинка. Концентрация гидроксида натрия зафиксирована на уровне 300 г/дм³ (7,5 М NaOH), но были исследованы и другие концентрации (350, 400, 450 и 500 г/дм³). Выход по току был близок к 100% независимо от концентрации гидроксида натрия, плотности тока или температуры.

Диапазон плотности тока варьировался от 50 до 1000 А/м² при напряжении на ячейке от 2,0 до 3,0 В. Температуру электролита изменяли в пределах от 24 до 74 °С. Плотность осадка уменьшается с температурой, это означает, что после нагревания электролита катодный осадок становится более пористым.

Выход по току возрастает с увеличением плотности тока при всех концентрациях цинка и щелочи, хотя увеличение меньше при более высоких плотностях тока (выше 2500 А/м²). Очевидно, что перенапряжение осаждения цинка меньше, чем перенапряжение для выделения водорода, при всех плотностях тока, и осаждение цинка протекает легче, когда эта разность больше.

Расход электроэнергии при щелочном электролизе при плотности тока 1000 А/м² составляет около 1,75 кВт·ч/кг по сравнению с 3,3 кВт·ч/кг при 500 А/м² в классическом промышленном процессе, использующем кислые сульфатные электролиты.

6. Образование порошков цинка разной морфологии при катодном осаждении в щелочной среде до сих пор полностью не объяснено. Среди методов, которые были использованы для изменения и контроля этой морфологии: импульсный, переменный, реверсивный ток, ультразвук, неорганические и органические добавки, материал катода, наложение магнитного поля и др.

Морфология цинковых осадков, полученных в щелочных растворах при высоких плотностях постоянного тока, зависит в том числе от подложки и продолжительности электролиза. Благодаря высокой удельной площади поверхности, реальная плотность тока уменьшается. Например, при плотностях тока в диапазоне от 1000 до 5000 А/м² увеличение площади поверхности составляло от 20 до 25 раз. Для всех условий увеличение плотности тока изменяет форму порошка от плотной и одноосной – до дендритной. При плотности тока выше 3500 А/м² никаких существенных изменений в морфологии и крупности осадка не происходит.

7. Предложено и опробовано несколько перспективных добавок, влияющих на морфологию осадков цинка на катоде, однако отсутствует систематическое исследование механизма, посредством которого добавки подавляют рост дендритов цинка. В качестве добавки для подавления роста дендритов при щелочной электроэкстракции цинка изучен полиэтилененимин (PEI). Исследовано также влияние добавки поливиниловых спиртов, полиаминов и карбонильных соединений. Использовали анионные ПАВ, такие как додецилбензолсульфонат натрия и додецилсульфат натрия, уменьшающие размер зерна цинкового порошка. Сообщается, что перенапряжение выделения водорода при образовании мелкодисперсного цинкового порошка значительно снижают винная, лимонная кислоты и их производные.

Широкий диапазон классов исследуемых органических добавок с противоположными механизмами влияния свидетельствует об отсутствии единого подхода к их выбору.

8. Имеются результаты использования импульсного тока, высокочастотных импульсов прямоугольной формы и моделирования влияния импульсного тока на морфологию катодных осадков цинка. Описан новый эффективный метод получения однородных и тонких порошков цинка с использованием импульсного режима подачи постоянного тока. Важным практическим преимуществом импульсного электролиза является возможность управления свойствами порошкового осадка и улучшения его качества.

Библиографический список

1. Youcai Z., Stanforth R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium // J. Hazard. Mater. 2000. Vol. 80. P. 223–240.
2. Shaohua J., Yifei Z., Yi Z., Peiyi X., Yihui W. Clean hydrometallurgical route to recover zinc, silver, lead, copper, cadmium and iron from hazardous jarosite residues produced during zinc hydrometallurgy // J. Hazard. Mater. 2011. Vol. 192. P. 554–558.
3. Herrero D., Arias P.L., Güemez B., Barrio V.L., Cambra J.F., Requies J. Hydrometallurgical process development for the production of a zinc sulphate liquor suitable for electrowinning // Miner. Eng. 2010. Vol. 23. P. 511–517.
4. Youcai Z., Stanforth R. Selective separation of lead from alkaline zinc solution by sulfide precipitation // Sep. Sci. Technol. 2001. Vol. 36. P. 2561–2570.
5. 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 // J. Hazard. Mater. 2010. Vol. 179. P. 1–7.
6. Trung Z.H., Kukurugya F., Takacova Z., Orac D., Laubertova M., Miskufova A., Havlik T. Acidic leaching both of zinc and iron from basic oxygen furnace sludge // J. Hazard. Mater. 2011. Vol. 192. P. 1100–1107.
7. Langova S., Riplova J., Vallova S. Atmospheric leaching of steel-making wastes and the precipitation of goethite from the ferric sulphate solution // Hydrometallurgy. 2007. Vol. 87. P. 157–162.
8. Ju S.H., Zhang Y.F., Zhang Y., Xue P.Y., Wang Y.H. Clean hydrometallurgical route to recover zinc, silver, lead, copper, cadmium and iron from hazardous jarosite residues produced during zinc hydrometallurgy // J. Hazard. Mater. 2011. Vol. 192. P. 554–558.
9. Swarnkar S.R., Gupta B.L., Sekharan R.D. Iron control in zinc plant residue leach solution // Hydrometallurgy. 1996. Vol. 42. P. 21–26.
10. Muresan L., Maurin G., Oniciu L., Gaga D. Influence of metallic impurities on zinc electrowinning from sulphate electrolyte // Hydrometallurgy. 1996. Vol. 43. P. 345–354.
11. Chen A.L., Zhao Z.W., Jia X.J., Long S., Huo G.S., Chen X.Y. Alkaline leaching Zn and its concomitant metals from refractory hemimorphite zinc oxide ore // Hydrometallurgy. 2009. Vol. 97. P. 228–232.
12. Feng L.Y., Yang X.W. Pelletizing and alkaline leaching of powdery low grade zinc oxide ores // Hydrometallurgy. 2007. Vol. 89. P. 305–310.
13. Zhao Y.C., Stanforth R. Production of Zn powder by alkaline treatment of smithsonite Zn–Pb ores // Hydrometallurgy. 2000. Vol. 56, pp. 237–249.
14. Zhang Y.C., Deng J.X., Chen J., Yu R.B., Xing X.R. Leaching of zinc from calcined smithsonite using sodium hydroxide



// Hydrometallurgy. 2013. Vol. 131–132. P. 89–92.

15. Gurmen S., Emre M. A laboratory-scale investigation of alkaline zinc electrowinning // Miner. Eng. 2003. Vol. 16. P. 559–562.
16. Dutra A.J.B., Paiva P.R.P., Tavares L.M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust // Min. Eng. 2006. Vol. 19. P. 478–485.
17. Gupta M.K., Gupta B.L., Raghavan R. Investigation of use of zinc dross as a substitute for zinc dust in solution purification in zinc electrowinning hydrometallurgical plant // Hydrometallurgy. 1989. Vol. 22. P. 379–391.
18. Frenay J., Ferlay S., Hissel J. Zinc and lead recovery from EAF dusts by caustic soda process electric furnace proceedings, treatment options for carbon steel electric arc furnace dust // Iron Steel Soc. 1986. Vol. 43. P. 417–421.
19. St-Pierre J., Piron D.L. Electrowinning of zinc from alkaline solutions at high current densities // J. Appl. Electrochem. 1990. Vol. 20. P. 163–165.
20. Бальшин М.Ю. Порошковая металлургия. М: ГНТИ машиностроительной литературы. 1948. С. 29–30.
21. Шатт В. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / пер. с нем. М: Металлургия, 1983. 520 с.
22. Стендер В.В. Прикладная электрохимия. Харьков: Изд-во ХГУ, 1961. 543 с.
23. Qiang Lia, Youcai Zhao, Jiachao Jiang, Chenglong Zhang. Optimized hydrometallurgical route to produce ultrafine zinc powder from industrial wastes in alkaline medium // Procedia Environmental Sciences. 2012. Vol. 16. P. 674–682.
24. Piron D.L., Sider M. Comparison of energy-consumption in improved sulfate process and alternative technologies for zinc electrowinning // CIM Bull. 1988. Vol. 81, Issue 914. P. 131–132.
25. St-Pierre J., Piron D.L. Mechanism of cathodic potential oscillations of the zinc electrode in alkaline-solutions // J. Electrochemical Society. 1990. Vol. 137. No. 8. P. 2491–2498.
26. Sui S.C., Evans J.W. Efficient electrowining of zinc from alkaline electrolytes. U.S. Patent 5958210, 1999.
27. Habashi F. Handbook of Extractive Metallurgy, vol. 2. Wiley-VCH, 1991. P. 641–676.
28. Баймаков Ю.В., Журин А.И. Электролиз в гидрометаллургии. М: Металлургиздат. 1963. 616 с.
29. Ferlay S., Weill P. Alkaline zinc hydrometallurgy: an opportunity for the treatment of complex ores. (Zimaval techn.) / The 40 Conference of Metallurgists (COM 2001), Toronto, 2001. P. 41–51.
30. Березин Н.В., Гудин Н.Б., Филиппова А.Г. Электроосаждение металлов и сплавов из водных растворов комплексных соединений. Казань: Изд-во Казанского гос. технол. ун-та. 2006. 276 с.
31. Brenner A. Electrodeposition of Alloys. Academic Press, New York. 1963. P. 22–35.
32. Zhang Y., Deng J., Chen J., Yua R., Xing X. The electrowinning of zinc from sodium hydroxide solutions // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 146. P. 59–63.
33. Brenner A. Electrodeposition of alloys principles and practice. New York, Academic Press, 1963, Vol. 1. P. 402 p.
34. Trejo G., Ruiz H., Ortega Borges R., Meas Y. Influence of polyethoxylated additives on zinc electrodeposition from acidic solutions // J. Appl. Electrochem. 2001. Vol. 31. P. 685.
35. St-Pierre J., Piron D.L., Electrowinning of zinc from alkaline solutions // J. Appl. Electrochem. 1986. Vol. 16. P. 447–456.
36. Degrez M., Duchene A., Fontana A., Winand R. A modified hull cell with forced electrolyte flow: simulation of industrial electroplating conditions // J. Appl. Electrochem. 1993. Vol. 23. P. 1285–1292.
37. Naybour R.D. The effect of electrolyte flow on the morphology of zinc electrodeposited from aqueous alkaline solution containing zincate ions // J. Electrochem. Soc. 1969. Vol. 116. No. 4. P. 520–524.
38. Keliang Wang, Pucheng Pei, Ze Ma, Huachi Xu, Pengcheng Li, Xizhong Wang. Morphology control of zinc regeneration for zinc-air fuel cell and battery // Journal of Power Sources. 2014. Vol. 271. P. 65–75.
39. Diggle J.W., Despic A.R., Bockris J. The Mechanism of the dendritic electrocrystallization of zinc // J. Electrochem. Soc. 1969. Vol. 116. No. 11. P. 1503–1514.
40. Lucas S., Moskovkin P. Simulation at high temperature of atomic deposition, islands coalescence, Ostwald and inverse Ostwald ripening with a general simple kinetic Monte Carlo code // Thin Solid Films. 2010. Vol. 518, no. 18. P. 5355–5361.
41. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // Phys. Rev. Lett. 1981. Vol. 47. No. 19. P. 1400.
42. Kahanda G., Tomkiewicz M. Morphological evolution in zinc electrodeposition // J. Electrochem. Soc. 1989. Vol. 136, no. 5. P. 1497–1502.
43. Chen C.P., Jorne J. Fractal analysis of zinc electrodeposition // J. Electrochem Soc. 1990. Vol. 137. No. 7. P. 2047–2051.
44. Popov K.I., Maksimović M.D., Trnjančev J.D. Dendritic electrocrystallization and the mechanism of powder formation in the potentiostatic electrodeposition of metals // Journal of applied electrochemistry. 1981. Vol. 11. P. 239–246.
45. Simić M.V., Popov K.I., Krstajić N.V. An experimental study of zinc morphology in alkaline electrolyte at low direct and pulsating overpotentials // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2000. Vol. 484, Issue 1. P. 18–23.
46. Popov K.I., Maksimović M.D., Zecević S.K., Stojić M.R. Surface roughening and dendritic growth in pulsating overpotential copper electrodeposition // Surface and Coating Technology. 1986. Vol. 27. P. 117–129.
47. Ravindran V., Muralidharan V.S. Inhibition of zinc corrosion in alkali solutions // Journal of Power Sources. 1995. Vol. 55 (2. P. 237–241.
48. Sharifi B., Mojtahedi M., Goodarzi M., Vahdati J.K. Effect of alkaline electrolysis conditions on current efficiency and morphology of zinc powder // Hydrometallurgy. 2009. Vol. 99. P. 72–76.
49. Eacott J.G., Robinson M.C. Busse E. Techno-economic feasibility of zinc and lead recovery from electric-arc furnace baghouse dust // CIM Bulletin. 1984. Vol. 77, Issue 866. P. 41.

50. Tjong S.C., Chen H. Nanocrystalline materials and coatings // Mater. Sci. Eng. 2004. Vol. 45. P. 1–88.
51. Vaghayenagar M., Kermanpur A., Abbasi M.H., Ghasemi Yazdabadi H. Effects of process parameters on synthesis of Zn ultrafine/nanoparticles by electromagnetic levitational gas condensation // Adv. Powder Technol. 2010. Vol. 21. P. 556–563.
52. Carvalho M.F., Rubin W., Carlos I.A. Study of the influence of the polyalcohol mannitol on zinc electrodeposition from an alkaline bath // J. Appl. Electrochem. 2010. Vol. 40. P. 1625–1632.
53. Recendiz A., Gonzalez I., Nava J. Current efficiency studies of the zinc electrowinning process on aluminum rotating cylinder electrode (RCE) in sulfuric acid medium: Influence of different additives // Electrochim. Acta. 2007. Vol. 52. P. 6880–6887.
54. Ivanov I. Increased current efficiency of zinc electrowinning in the presence of metal impurities by addition of organic inhibitors // Hydrometallurgy. 2004. Vol. 72. P. 73–78.
55. Кудра О., Гитман Е. Электролитическое получение металлических порошков. Киев: Изд-во АН УкрССР. 1952. 144 с.
56. Shivkumar R., Paruthimal Kalaigan G., Vasudevan T. Studies with porous zinc electrodes with additives for secondary alkaline batteries // Journal of Power Sources. 1998. Vol. 75 (1). P. 90–100.
57. McBreen J., Gannon E. The electrochemistry of metal oxide additives in pasted zinc electrodes // Electrochimica Acta. 1981. Vol. 26 (10). P. 1439–1446.
58. McBreen J., Gannon E. Bismuth oxide as an additive in pasted zinc electrodes // Journal of Power Sources. 1985. Vol. 15. P. 169–177.
59. Hu Ch., Chang Ch. Anodic stripping of zinc deposits for aqueous batteries: effects of anions, additives, current densities, and plating modes // Materials Chemistry and Physics. 2004. Vol. 86 (1). P. 195–203.
60. Рудой В.М., Ярославцева О.В., Останина Т.Н., Юркина Л.П., Субботина О.Ю. Электропроводность металл-наполненных полимерных композиций // Защита металлов. 1998. Т. 34. № 5. С. 527–532.
61. Даринцева А.Б., Патрушев А.В., Останина Т.Н., Малков В.Б. Электрокристаллизация дендритных осадков цинка и никеля в гальваностатических условиях // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. Вып. 19. С. 62–66.
62. Ghavami R.K., Rafiei Z. Performance improvements of alkaline batteries by studying the effects of different kinds of surfactant and different derivatives of benzene on the electrochemical properties of electrolytic zinc // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 162. P. 893–899.
63. Lee C.W., Sathiyarayanan, K., Eom S.W., Kim H.S., Yun M.S. Novel electrochemical behavior of zinc anodes in zinc/air batteries in the presence of additives. (Short communication) // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 159. P. 1474–1477.
64. Diggle J.W. Crystallographic and morphological studies of electrolytic zinc dendrites grown from alkaline zincate solutions // Journal of Material Science. 1973. Vol. 8 (1). P. 79–87.
65. Naybour R.D., Morphologies of zinc electrodeposited from zinc-saturated aqueous alkaline solution // Electrochim. Acta. 1968. Vol. 13. P. 763–769.
66. Bockris J.O., Nagy Z., Damjanovic A. J. On the Deposition and Dissolution of Zinc in Alkaline Solutions // Electrochem. Soc. 1972. Vol. 119. P. 285.
67. Oren Y., Landau U. Growth of zinc dendrites in acidic zinc chloride solutions // Electrochim. Acta. 1982. Vol. 27. P. 739–748.
68. Barkey D.P., Watt D., Liu Z., Raber S. The Role of Induced Convection in Branched Electrodeposit Morphology Selection // J. Electrochem. Soc. 1994. Vol. 141. P. 1206–1212.
69. Boto K. Organic additives in zinc electroplating // Electrodep. Surf. 1975. No. 3. P. 77–95.
70. Tripathy B.C., Das S.C., Hefter G.T., Singh P. Zinc electrowinning from acidic sulfate solutions: Part I: Effects of sodium lauryl sulfate // J. Appl. Electrochem. 1997. Vol. 27. P. 673–678.
71. Aaboubi O., Douglade J., Abenagui X., Boumedmed R., VonHoff J. Influence of tartaric acid on zinc electrodeposition from sulphate bath // Electrochim. Acta. 2011. Vol. 56. P. 7885–7889.
72. Lee J.Y., Kim J.W., Lee M.K., Shin H.J., Kim H.T., Park S.M. Effects of Organic Additives on Initial Stages of Zinc Electroplating on Iron // J. Electrochem. Soc. 2004. Vol. 151. P. 25–31.
73. Thomas B.K., Fray D.J. The effect of additives on the morphology of zinc electrodeposited from a zinc chloride electrolyte at high current densities // J. Appl. Electrochem. 1981. Vol. 11. P. 677–683.
74. Banik S.J., Akolkar R. Suppressing dendrite growth during zinc electrodeposition by PEG-200 additive // J. Electrochem. Soc. 2013. Vol. 160. P. 519–523.
75. Ortiz-Aparicio J.L., Meas Y., Trejo G., Ortega R., Chapman T.W., Chainet E. Effects of organic additives on zinc electrodeposition from alkaline electrolytes // J. Appl. Electrochem. 2013. Vol. 43. P. 289–300.
76. Shanmugasigamani M. Pushpavanam. Role of additives in bright zinc deposition from cyanide free alkaline baths // Appl. Electrochem. 2006. Vol. 36. P. 315–322.
77. Hsieh J.C., Hu C.C., Lee T.C. Effects of polyamines on the deposition behavior and morphology of zinc electroplated at high-current densities in alkaline cyanide-free baths // Surf. Coat. Tech. 2009. Vol. 203. P. 3111–3115.
78. Kavitha B., Santhosh P., Renukadevi M., Kalpana A., Shakkthivel P., Vasudevan T. Role of organic additives on zinc plating // Surf. Coat. Tech. 2006. Vol. 201. P. 3438–3442.
79. Stephen J. Banik, Rohan Akolkar. Suppressing dendritic growth during alkaline zinc electrodeposition using polyethyl-enimine additive // Electrochimica Acta. 2015. Vol. 179. P. 475–481.



80. Chandrasekar M.S., Shanmugasigamani P. Synergetic effects of pulse constraints and additives in electrodeposition of nanocrystalline zinc: corrosion, structural and textural characterization // *Mater. Chem. Phys.* 2010. Vol. 124. P. 516–528.
81. Saber Kh., Koch C.C., Fedkiw P.S. Pulse current electrodeposition of nanocrystalline zinc // *Mater. Sci. Eng.* 2003. Vol. 341. P. 174–181.
82. Youssef K.M., Koch C.C., Fedkiw P.S. Influence of pulse plating parameters on the synthesis and preferred orientation of nanocrystalline zinc from zinc sulfate electrolytes // *Electrochim. Acta.* 2008. Vol. 54. P. 677–683.
83. Arouete S., Blurton K.F., Oswin H.G. Controlled current deposition of zinc from alkaline solution // *J. Electrochem. Soc.* 1969. Vol. 116. P. 166–169.
84. Despic A.R., Popov K.I. The effect of pulsating potential on the morphology of metal deposits obtained by mass-transport controlled electrodeposition // *J. Appl. Electrochem.* 1971. No. 1. P. 275–278.
85. Ibl N. Some theoretical aspects of pulse electrolysis // *Surf. Technol.* 1980. No. 10. P. 81–104.
86. Li Qiang, Isabel S.S. Pinto, Zhao Youcai. Sequential stepwise recovery of selected metals from flue dusts of secondary copper smelting // *Journal of Cleaner Production.* 2014. Vol. 84. P. 663–670.

References

1. Youcai Z., Stanforth R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium. *J. Hazard. Mater.* 2000, vol. 80, pp. 223–240.
2. Shaohua J., Yifei Z., Yi Z., Peiyi X., Yihui W. Clean hydrometallurgical route to recover zinc, silver, lead, copper, cadmium and iron from hazardous jarosite residues produced during zinc hydrometallurgy. *J. Hazard. Mater.* 2011, vol. 192, pp. 554–558.
3. Herrero D., Arias P.L., Güemez B., Barrio V.L., Cambra J.F., Requies J. Hydrometallurgical process development for the production of a zinc sulphate liquor suitable for electrowinning. *Miner. Eng.* 2010, vol. 23, pp. 511–517.
4. Youcai Z., Stanforth R. Selective separation of lead from alkaline zinc solution by sulfide precipitation. *Sep. Sci. Technol.* 2001, vol. 36, pp. 2561–2570.
5. 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. *J. Hazard. Mater.* 2010, vol. 179, pp. 1–7.
6. Trung Z.H., Kukurugya F., Takacova Z., Orac D., Laubertova M., Miskufova A., Havlik T. Acidic leaching both of zinc and iron from basic oxygen furnace sludge. *J. Hazard. Mater.* 2011, vol. 192, pp. 1100–1107.
7. Langova S., Riplova J., Vallova S. Atmospheric leaching of steel-making wastes and the precipitation of goethite from the ferric sulphate solution. *Hydrometallurgy.* 2007, vol. 87, pp. 157–162.
8. Ju S.H., Zhang Y.F., Zhang Y., Xue P.Y., Wang Y.H. Clean hydrometallurgical route to recover zinc, silver, lead, copper, cadmium and iron from hazardous jarosite residues produced during zinc hydrometallurgy. *J. Hazard. Mater.* 2011, vol. 192, pp. 554–558.
9. Swarnkar S.R., Gupta B.L., Sekharan R.D. Iron control in zinc plant residue leach solution // *Hydrometallurgy.* 1996, vol. 42, pp. 21–26.
10. Muresan L., Maurin G., Oniciu L., Gaga D. Influence of metallic impurities on zinc electrowinning from sulphate electrolyte. *Hydrometallurgy.* 1996, vol. 43, pp. 345–354.
11. Chen A.L., Zhao Z.W., Jia X.J., Long S., Huo G.S., Chen X.Y. Alkaline leaching Zn and its concomitant metals from refractory hemimorphite zinc oxide ore. *Hydrometallurgy* 2009, vol. 97, pp. 228–232.
12. Feng L.Y., Yang X.W. Pelletizing and alkaline leaching of powdery low grade zinc oxide ores. *Hydrometallurgy.* 2007, vol. 89, pp. 305–310.
13. Zhao Y.C., Stanforth R. Production of Zn powder by alkaline treatment of smithsonite Zn–Pb ores // *Hydrometallurgy.* 2000, vol. 56, pp. 237–249.
14. Zhang Y.C., Deng J.X., Chen J., Yu R.B., Xing X.R. Leaching of zinc from calcined smithsonite using sodium hydroxide. *Hydrometallurgy.* 2013, vol. 131–132, pp. 89–92.
15. Gurmen S., Emre M. A laboratory-scale investigation of alkaline zinc electrowinning. *Miner. Eng.* 2003, vol. 16, pp. 559–562.
16. Dutra A.J.B., Paiva P.R.P., Tavares L.M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust. *Min. Eng.* 2006, vol. 19, pp. 478–485.
17. Gupta M.K., Gupta B.L., Raghavan R. Investigation of use of zinc dross as a substitute for zinc dust in solution purification in zinc electrowinning hydrometallurgical plant. *Hydrometallurgy.* 1989, vol. 22, pp. 379–391.
18. Frenay J., Ferlay S., Hissel J. Zinc and lead recovery from EAF dusts by caustic soda process electric furnace proceedings, treatment options for carbon steel electric arc furnace dust. *Iron Steel Soc.* 1986, vol. 43, pp. 417–421.
19. St-Pierre J., Piron D.L. Electrowinning of zinc from alkaline solutions at high current densities. *J. Appl. Electrochem.* 1990, vol. 20, pp. 163–165.
20. Balshin M.Yu. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. Moscow: State scientific and technical publishing house of engineering literature, 1948, pp. 29–30. (In Russ.).
21. Shatt V. Powder metallurgy. Sintered and Composite Materials *Poroshkovaya metallurgiya*, 1983, 520 p. (Russ. ed.: *Poroshkovaya metallurgiya. Spechennyye i kompozitsionnyye materialy*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 520 p.).
22. Stender V.V. *Prikladnaya elektrokimiya* [Applied Electrochemistry]. Khar'kov: Kharkov State University Publ., 1961,

543 p. (In Russ.).

23. Qiang Lia, Youcai Zhao, Jiachao Jiang, Chenglong Zhang. Optimized hydrometallurgical route to produce ultrafine zinc powder from industrial wastes in alkaline medium. *Procedia Environmental Sciences*. 2012, vol. 16, pp. 674–682.
24. Piron D.L.; Sider M. Comparison of energy-consumption in improved sulfate process and alternative technologies for zinc electrowinning. *CIM Bull.* 1988, vol. 81, Issue 914, pp. 131–132.
25. St-Pierre J; Piron D.L. Mechanism of cathodic potential oscillations of the zinc electrode in alkaline-solutions. *J. Electrochemical Society*. 1990, vol. 137, no 8, pp. 2491–2498.
26. Sui S.C., Evans J.W. Efficient electrowinning of zinc from alkaline electrolytes. U.S. Patent 5958210, 1999.
27. Habashi F. *Handbook of Extractive Metallurgy*, vol. 2. Wiley-VCH, 1991, pp. 641–676.
28. Baymakov YU.V., Zhurin A.I. *Elektroliz v gidrometallurgii* [Electrolysis in hydrometallurgy]. Moscow: Metallurgizdat Publ., 1963, 616 p. (In Russ.).
29. Ferlay S., Weill P. Alkaline zinc hydrometallurgy: an opportunity for the treatment of complex ores. (Zimaval techn.). The 40 Conference of Metallurgists (COM 2001), Toronto, 2001, pp. 41–51.
30. Berezin N.V., Gudim N.B., Filippova A.G. *Elektroosazhdeniye metallov i spлавov iz vodnykh rastvorov kompleksnykh soyedineniy* [Electrodeposition of metals and alloys from aqueous solutions of complex compounds]. Kazan: Kazan State technological university Publ., 2006, 276 p. (In Russ.).
31. Brenner A. *Electrodeposition of Alloys*. Academic Press, New York. 1963, pp. 22–35.
32. Zhang Y., Deng J., Chen J., Yua R., Xing X. The electrowinning of zinc from sodium hydroxide solutions. *Hydrometallurgy*. 2014, vol. 146, pp. 59–63.
33. Brenner A. *Electrodeposition of alloys principles and practice*. New York, Academic Press, 1963, vol. 1, 402 p.
34. Trejo G., Ruiz H., Ortega Borges R., Meas Y. Influence of polyethoxylated additives on zinc electrodeposition from acidic solutions. *J. Appl. Electrochem.* 2001, vol. 31, p. 685.
35. St-Pierre J., Piron D.L., Electrowinning of zinc from alkaline solutions. *J. Appl. Electrochem.* 1986, vol. 16, pp. 447–456.
36. Degrez M., Duchene A., Fontana A., Winand R. A modified hull cell with forced electrolyte flow: simulation of industrial electroplating conditions. *J. Appl. Electrochem.* 1993, vol. 23, pp. 1285–1292.
37. Naybour R.D. The effect of electrolyte flow on the morphology of zinc electrodeposited from aqueous alkaline solution containing zincate ions. *J. Electrochem. Soc.* 1969, vol. 116, no. 4, pp. 520–524.
38. Keliang Wang, Pucheng Pei, Ze Ma, Huachi Xu, Pengcheng Li, Xizhong Wang. Morphology control of zinc regeneration for zinc-air fuel cell and battery. *Journal of Power Sources*. 2014, vol. 271, pp. 65–75.
39. Diggle J.W., Despic A.R., Bockris J. The Mechanism of the dendritic electrocrystallization of zinc. *J. Electrochem. Soc.* 1969, vol. 116, no. 11, pp. 1503–1514.
40. Lucas S., Moskovkin P. Simulation at high temperature of atomic deposition, islands coalescence, Ostwald and inverse Ostwald ripening with a general simple kinetic Monte Carlo code. *Thin Solid Films*. 2010, vol. 518, no. 18, pp. 5355–5361.
41. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon. *Phys. Rev. Lett.* 1981, vol. 47, no. 19, p. 1400.
42. Kahanda G., Tomkiewicz M. Morphological evolution in zinc electrodeposition. *J. Electrochem. Soc.* 1989, vol. 136, no. 5, pp. 1497–1502.
43. Chen C.P., Jorne J. Fractal analysis of zinc electrodeposition. *J. Electrochem Soc.* 1990, vol. 137, no. 7, pp. 2047–2051.
44. Popov K.I., Maksimović M.D., Trnjančev J.D. Dendritic electrocrystallization and the mechanism of powder formation in the potentiostatic electrodeposition of metals. *Journal of applied electrochemistry*. 1981, vol. 11, pp. 239–246.
45. Simić M.V., Popov K.I., Krstajić N.V. An experimental study of zinc morphology in alkaline electrolyte at low direct and pulsating overpotentials. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2000, vol. 484, Issue 1, pp. 18–23.
46. Popov K.I., Maksimović M.D., Zečević S.K., Stojić M.R. Surface roughening and dendritic growth in pulsating overpotential copper electrodeposition. *Surface and Coating Technology*. 1986, vol. 27, pp. 117–129.
47. Ravindran V., Muralidharan V.S. Inhibition of zinc corrosion in alkali solutions. *Journal of Power Sources*. 1995, vol. 55 (2), pp. 237–241.
48. Sharifi B., Mojtahedi M., Goodarzi M., Vahdati J.K. Effect of alkaline electrolysis conditions on current efficiency and morphology of zinc powder. *Hydrometallurgy*. 2009, vol. 99, pp. 72–76.
49. Eacott J.G., Robinson M.C. Busse E. Techno-economic feasibility of zinc and lead recovery from electric-arc furnace baghouse dust. *CIM Bulletin*. 1984, vol. 77, Issue 866, p. 41.
50. Tjong S.C., Chen H. Nanocrystalline materials and coatings. *Mater. Sci. Eng.* 2004, vol. 45, pp. 1–88.
51. Vaghayenagar M., Kermanpur A., Abbasi M.H., Ghasemi Yazdabadi H. Effects of process parameters on synthesis of Zn ultrafine/nanoparticles by electromagnetic levitational gas condensation. *Adv. Powder Technol.* 2010, vol. 21, pp. 556–563.
52. Carvalho M.F., Rubin W., Carlos I.A. Study of the influence of the polyalcohol mannitol on zinc electrodeposition from an alkaline bath. *J. Appl. Electrochem.* 2010, vol. 40, pp. 1625–1632.
53. Recendiz A., Gonzalez I., Nava J. Current efficiency studies of the zinc electrowinning process on aluminum rotating cylinder electrode (RCE) in sulfuric acid medium: Influence of different additives. *Electrochim. Acta*. 2007, vol. 52, pp. 6880–6887.
54. Ivanov I. Increased current efficiency of zinc electrowinning in the presence of metal impurities by addition of organic inhibitors. *Hydrometallurgy*. 2004, vol. 72, pp. 73–78.
55. Kudra O., Gitman E. *Elektroliticheskoye polucheniye metallicheskih poroshkov* [Electrolytic production of metal pow-



- ders]. Kiev: Academy of Sciences UkSSR Publ., 1952, 144 p. (In Russ.).
56. Shivkumar R., Paruthimal Kalaigan G., Vasudevan T. Studies with porous zinc electrodes with additives for secondary alkaline batteries. *Journal of Power Sources*. 1998, vol. 75 (1), pp. 90–100.
57. McBreen J., Gannon E. The electrochemistry of metal oxide additives in pasted zinc electrodes. *Electrochimica Acta*. 1981, vol. 26 (10), pp. 1439–1446.
58. McBreen J., Gannon E. Bismuth oxide as an additive in pasted zinc electrodes. *Journal of Power Sources*. 1985, vol. 15, pp. 169–177.
59. Hu Ch., Chang Ch. Anodic stripping of zinc deposits for aqueous batteries: effects of anions, additives, current densities, and plating modes. *Materials Chemistry and Physics*. 2004, vol. 86 (1), pp. 195–203.
60. Rudoy V.M., Yaroslavl'tseva O.V., Ostanina T.N., Yurkina L.P., Subbotina O.Yu. Electrical conductivity of metal-filled polymer compositions. *Zashchita metallov* [Protection of metals], 1998, vol. 34, no. 5, pp. 527–532. (In Russ.).
61. Darintseva A.B., Patrushev A.V., Ostanina T.N., Malkov V.B. Electrocrystallization of dendritic precipitation of zinc and nickel in galvanostatic conditions. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2012, vol. 15, Issue 19, pp. 62–66 (In Russ.).
62. Ghavami R.K., Rafiei Z. Performance improvements of alkaline batteries by studying the effects of different kinds of surfactant and different derivatives of benzene on the electrochemical properties of electrolytic zinc. *Journal of Power Sources*. 2006, vol. 162, pp. 893–899.
63. Lee C.W., Sathiyarayanan, K., Eom S.W., Kim H.S., Yun M.S. Novel electrochemical behavior of zinc anodes in zincair batteries in the presence of additives. (Short communication). *Journal of Power Sources*. 2006, vol. 159, pp. 1474–1477.
64. Diggle J.W. Crystallographic and morphological studies of electrolytic zinc dendrites grown from alkaline zincate solutions. *Journal of Material Science*. 1973, vol. 8 (1), pp. 79–87.
65. Naybour R.D., Morphologies of zinc electrodeposited from zinc-saturated aqueous alkaline solution. *Electrochim. Acta*. 1968, vol. 13, pp. 763–769.
66. Bockris J.O., Nagy Z., Damjanovic A. J. On the Deposition and Dissolution of Zinc in Alkaline Solutions. *Electrochem. Soc.* 1972, vol. 119, p. 285.
67. Oren Y., Landau U. Growth of zinc dendrites in acidic zinc chloride solutions. *Electrochim. Acta*. 1982, vol. 27, pp. 739–748.
68. Barkey D.P., Watt D., Liu Z., Raber S. The Role of Induced Convection in Branched Electrodeposit Morphology Selection. *J. Electrochem. Soc.* 1994, vol. 141, pp. 1206–1212.
69. Boto K. Organic additives in zinc electroplating. *Electrodep. Surf.* 1975, no. 3, pp. 77–95.
70. Tripathy B.C., Das S.C., Hefter G.T., Singh P. Zinc electrowinning from acidic sulfate solutions: Part I: Effects of sodium lauryl sulfate. *J. Appl. Electrochem.* 1997, vol. 27, pp. 673–678.
71. Aaboubi O., Douglade J., Abenaqui X., Boumedmed R., VonHoff J. Influence of tartaric acid on zinc electrodeposition from sulphate bath. *Electrochim. Acta*. 2011, vol. 56, pp. 7885–7889.
72. Lee J.Y., Kim J.W., Lee M.K., Shin H.J., Kim H.T., Park S.M. Effects of Organic Additives on Initial Stages of Zinc Electroplating on Iron. *J. Electrochem. Soc.* 2004, vol. 151, pp. 25–31.
73. Thomas B.K., Fray D.J. The effect of additives on the morphology of zinc electrodeposited from a zinc chloride electrolyte at high current densities. *J. Appl. Electrochem.* 1981, vol. 11, pp. 677–683.
74. Banik S.J., Akolkar R. Suppressing dendrite growth during zinc electrodeposition by PEG-200 additive. *J. Electrochem. Soc.* 2013, vol. 160, pp. 519–523.
75. Ortiz-Aparicio J.L., Meas Y., Trejo G., Ortega R., Chapman T.W., Chainet E. Effects of organic additives on zinc electrodeposition from alkaline electrolytes. *J. Appl. Electrochem.* 2013, vol. 43, pp. 289–300.
76. Shanmugasigamani M. Pushpavanam. Role of additives in bright zinc deposition from cyanide free alkaline baths. *Appl. Electrochem.* 2006, vol. 36, pp. 315–322.
77. Hsieh J.C., Hu C.C., Lee T.C. Effects of polyamines on the deposition behavior and morphology of zinc electroplated at high-current densities in alkaline cyanide-free baths. *Surf. Coat. Tech.* 2009, vol. 203, pp. 3111–3115.
78. Kavitha B., Santhosh P., Renukadevi M., Kalpana A., Shakkthivel P., Vasudevan T. Role of organic additives on zinc plating. *Surf. Coat. Tech.* 2006, vol. 201, pp. 3438–3442.
79. Stephen J. Banik, Rohan Akolkar. Suppressing dendritic growth during alkaline zinc electrodeposition using polyethylenimine additive. *Electrochimica Acta*. 2015, vol. 179, pp. 475–481.
80. Chandrasekar M.S., Shanmugasigamani P. Synergetic effects of pulse constraints and additives in electrodeposition of nanocrystalline zinc: corrosion, structural and textural characterization. *Mater. Chem. Phys.* 2010, vol. 124, pp. 516–528.
81. Saber Kh., Koch C.C., Fedkiw P.S. Pulse current electrodeposition of nanocrystalline zinc. *Mater. Sci. Eng.* 2003, vol. 341, pp. 174–181.
82. Youssef K.M., Koch C.C., Fedkiw P.S. Influence of pulse plating parameters on the synthesis and preferred orientation of nanocrystalline zinc from zinc sulfate electrolytes. *Electrochim. Acta*. 2008, vol. 54, pp. 677–683.
83. Arouete S., Blurton K.F., Oswin H.G. Controlled current deposition of zinc from alkaline solution. *J. Electrochem. Soc.* 1969, vol. 116, pp. 166–169.
84. Despic A.R., Popov K.I. The effect of pulsating potential on the morphology of metal deposits obtained by mass-transport controlled electrodeposition. *J. Appl. Electrochem.* 1971, no. 1, pp. 275–278.
85. Ibl N. Some theoretical aspects of pulse electrolysis. *Surf. Technol.* 1980, no. 10, pp. 81–104.
86. Li Qiang, Isabel S.S. Pinto, Zhao Youcai. Sequential stepwise recovery of selected metals from flue dusts of secondary copper smelting. *Journal of Cleaner Production*. 2014, vol. 84, pp. 663–670.

Критерии авторства

Мамяченков С.В., Якорнов С.А., Анисимова О.С., Блудова Д.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мамяченков Сергей Владимирович,
профессор, доктор технических наук,
заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
e-mail: svmamachenkov@yandex.ru

Якорнов Сергей Александрович,
кандидат технических наук,
заместитель технического директора по металлургии
ООО «УГМК-Холдинг»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
e-mail: s.yakornov@ugmk.com

Анисимова Ольга Сергеевна,
кандидат химических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
e-mail: osanis@mail.ru

Блудова Дана Иршековна,
инженер-исследователь кафедры
металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
e-mail: dana.bludova@urfu.ru

Authorship criteria

Mamyachenkov S.V., Yakornov S.A., Anisimova O.S., Bludova D.I. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Mamyachenkov,
Professor, Dr. Sci. (Eng.),
Head 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, Russian Federation

Sergey A. Yakornov,
Cand. Sci.(Eng.),
Deputy technical Director for metallurgy of UMMC-Holding LLC,
1 Uspenskiy pr., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russian
Federation,
e-mail: s.yakornov@ugmk.com

Olga S. Anisimova,
Cand. Chemical (Eng.),
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, Russian Federation
e-mail: osanis@mail.ru

Dana I. Bludova
Research Engineer 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, Russian Federation



Поведение бокситовых концентратов на стадии выщелачивания по способу Байера

© А.Д. Рис, А.В. Сундунов, О.А. Дубовиков

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

Резюме: Цель – изучение поведения бокситового концентрата, полученного по способу термохимия-Байер на стадии автоклавного выщелачивания; исследование влияния дозировки оксида кальция, подаваемого на автоклавное выщелачивание бокситового концентрата по способу Байера, и определение его оптимального количества. Отработка методики контроля вскрываемости бокситовых концентратов с использованием химического анализа твердой и жидкой фаз. Получение термоактивированного продукта за счет обжига исходного боксита при температуре 1000°C, его обескремнивания щелочными растворами и последующей переработкой бокситового концентрата по способу Байера в автоклавных условиях. Проведение полного силикатного анализа твердой фазы (красного шлама) и определение содержания в жидкой фазе общей, каустической и карбонатной щелочи, а также количества Al_2O_3 и SiO_2 . Термическая активация боксита позволила получить продукт с кремниевым модулем (μ_{Si}) равным 11,6 из высокремнистого боксита одного из месторождений Российской Федерации. Проведено изучение влияния дозировки CaO на вскрываемость бокситового концентрата, а также анализ твердой и жидкой фаз, который показал возможность определения вскрываемости бокситового концентрата при автоклавном выщелачивании. Определена оптимальная дозировка оксида кальция. На основе проведенных лабораторных исследований установлено, что температурный режим обжига (1000°C) с последующей выдержкой в течение 1 часа позволяет, с одной стороны, получить качественный концентрат, а с другой – при дальнейшей традиционной гидрометаллургической переработке достичь теоретически возможного извлечения глинозема. Определено, что для данного типа бокситового концентрата оптимальная дозировка оксида кальция составляет 2,5% от навески концентрата. Химический анализ продуктов автоклавного выщелачивания показал возможность определения извлечения глинозема из бокситового концентрата в алюминатный раствор (не только по составу твердой, но и жидкой фазы). Разработана методика экспресс-анализа по составу жидкой фазы, позволяющая определить не только возможность получения бокситового концентрата с высоким кремниевым модулем, но и его вскрываемость на стадии байеровского выщелачивания.

Ключевые слова: производство глинозема, бокситы, термохимическая активация, бокситовый концентрат, автоклавное выщелачивание, оксид кальция

Информация о статье: Дата поступления 6 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 13 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Рис А.Д., Сундунов А.В., Дубовиков О.А. Поведение бокситовых концентратов на стадии Байеровского выщелачивания. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 395–403. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-395-403.

Bauxite concentrate behaviour at the leaching stage in the Bayer process

Aleksandra D. Ris, Aleksandr V. Sundurov, Oleg A. Dubovikov

Saint-Petersburg state mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract: The purpose of the paper is study of the behaviour of bauxite concentrate produced by the thermochemistry-Bayer method at the stage of pressure leaching; investigation of the effect of calcium oxide dosage supplied for bauxite concentrate pressure leaching in the Bayer process; determination of calcium oxide optimal dosage; development of methods to control bauxite concentrate opening using the chemical analysis of solid and liquid phases; production of thermoactivated product due to the roasting of initial bauxite at 1000 °C and its desiliconization with alkaline solutions, followed by bauxite concentrate leaching according to the Bayer method in autoclave conditions; complete silicate analysis of the solid phase (red mud) and determination of the content of general, caustic, carbonate alkali as well as Al_2O_3 and SiO_2 in the liquid phase. Thermal activation of bauxite allowed to obtain a product with a silicon module (μ_{Si}) that equals 11.6 from high-silica bauxite from one of the Russian deposits. The effect of CaO dosage on the opening of bauxite concentrate has been studied. The conducted analysis of solid and liquid phases has showed the possibility to deter-

mine bauxite concentrate opening at pressure leaching. The optimal dosage of calcium oxide has been determined. The conducted laboratory studies made it possible to find out that the firing temperature (1000 °C) followed by 1 hour exposure on the one hand ensures the obtaining of high-quality concentrate, and on the other, allows to achieve theoretically possible alumina extraction under further traditional hydrometallurgical processing. It has been estimated that the optimal dosage of calcium oxide for this type of bauxite concentrate is 2.5% of the concentrate weight. The chemical analysis of pressure leaching products has showed the possibility to determine alumina extraction from bauxite concentrate in the aluminate solution (by the composition of both solid and liquid phases). A methodology of rapid analysis based on the composition of the liquid phase has been developed. It enables determination of the production possibility of the bauxite concentrate with a high silicon module as well as estimate its opening at the leaching stage in the Bayer process.

Keywords: alumina production, bauxites, thermochemical activation, bauxite concentrate, pressure leaching, calcium oxide

Information about the article: Received February 6, 2019; accepted for publication March 13, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Ris A.D., Sundurov A.V., Dubovikov O.A. Bauxite concentrate behaviour at the leaching stage in the Bayer process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 395–403. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-395-403.

Введение

Переработка бокситов на глинозем по способу Байера имеет широкое распространение во всем мире. Ключевым параметром, определяющим возможность применения данного способа, является высокий кремниевый модуль исходных бокситов¹. Россия, несмотря на обширную минерально-сырьевую базу алюминийсодержащих руд, не обладает качественным бокситовым сырьем. Основным сырьем для получения глинозема являются бокситы и нефелины, однако альтернативой могут служить источники: алунитовые руды, каолины, кианиты, серициты, высокоглиноземистые золы, образующиеся при сжигании углей, металлургические шлаки, отходы обогащения углей [1–8]. Использование низкокачественного сырья, перерабатываемого по способу Байера, сопряжено с потерями щелочи и алюминия. При этом по-

тери возрастают с увеличением содержания диоксида кремния в исходном материале.

В работе приводятся результаты исследований переработки низкокачественного бокситового сырья по способу термохимия-Байер. Идея данного комбинированного способа состоит в целенаправленном изменении химико-минералогического состава боксита и последующей переработки полученного продукта в рамках традиционных технологий.

При проведении исследований было выявлено, что процесс термической активации связан со степенью муллитизации минералов (каолинита $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ и шамозита $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{O})_8$) исходного боксита на стадии обжига, которая в целом определяет дальнейшие параметры всего способа термохимия-Байер [9].

Цель исследования

Производство глинозема в настоящее время является комплексным и многопоточным. В нем используется разнообразное природное сырье [10, 11]. В связи с этим возникает необходимость в определении химического состава как исходного

сырья, так и технологических продуктов [12–15]. Все технологические операции неразрывно связаны с переработкой и использованием пульпы. Для успешного проведения технологического процесса необходим контроль различных параметров,

¹Производство глинозема: учебник для вузов / А.И. Лайнер; Под ред. Н.И. Еремина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1978. 344 с. / Alumina production: textbook for universities / A.I. Liner; Under the editorship of N. And. Eremina. Moscow: Metallurgy Publ., 1978, 344 p.



включая состав получаемых продуктов.

Аналитическая служба глиноземных предприятий, как правило, является централизованной и использует разнообразные физико-химические методы для проведения экспресс-анализом с цифровой обработкой результатов [16]. В то же время не утратили своего значения и традиционные химические методы анализа алюминатных растворов, которые широко используются в исследовательской работе лабораторий. Основными компонентами про-

мышленных растворов и пульп, получаемых при производстве глинозема, содержанием которых интересуются технологи и исследователи, являются: оксид алюминия Al_2O_3 , диоксид кремния SiO_2 и щелочи (каустическая (Na_2O_k) и общая ($Na_2O_{общ}$)) [17, 18].

Таким образом, разработка способа экспресс-анализа жидкой фазы, позволяющего в полной мере быстро и качественно определить содержание этих компонентов, является актуальной задачей.

Материалы и методы исследований

Для исследований был взят термоактивированный при $1000^\circ C$ боксит одного из месторождений Российской Федерации с $\mu_{Si} = 2,9$, была подготовлена партия бокситового концентрата следующего состава, соответственно, %: 74,3 – Al_2O_3 ; 6,4 – SiO_2 ; 5,8 – Fe_2O_3 ; 3,8 – TiO_2 ; 1,5 – CaO ; 0,1 – Cr_2O_3 ; 4,98 – ППП. Кремниевый модуль увеличился до 11,6. Концентрат был получен путем селективного выщелачивания обратным алюминатным раствором диоксида кремния.

Далее для определения вскрываемости полученного продукта на стадии выщелачивания, которое проводилось при температуре $240^\circ C$ в автоклавах из нержавеющей стали, вращающихся «через голову» в воздушном термостате², обратным алюминатным раствором Na_2O_k с концентрацией 250 г/дм³, с каустическим модулем (α_k) = 3,5, полученную бокситовую пульпу разделяли методом фильтрации на жидкую и твердую фазы. Твердая фаза, после промывки горячей водой, подвергалась полному силикатному анализу³ и определению степени извлечения оксида алюминия, которая характеризуется количеством оксида алюминия, перешедшего из исходного бок-

сита в алюминатный раствор после гидрометаллургической переработки.

Степень извлечения Al_2O_3 по твердой фазе (γ) можно рассчитать по формуле:

$$\gamma = \left[1 - \frac{Fe_2O_{3б.к.} \cdot Al_2O_{3к.ш.}}{Fe_2O_{3к.ш.} \cdot Al_2O_{3б.к.}} \right] \cdot 100\%,$$

где Fe_2O_3 и Al_2O_3 – процентное содержание в красном шламе (к.ш.) и бокситовом концентрате (б.к.), %.

Определить извлечение по жидкой фазе можно с помощью следующей формулы:

$$\gamma = \left[\frac{V \cdot 10^{-3} \cdot (Al_2O_{3а.р.} - Al_2O_{3о.р.})}{m \cdot Al_2O_{3б.к.}} \right] \cdot 100\%,$$

где V – объем алюминатного раствора, использованный для выщелачивания навески боксита массой m , мл; Al_2O_3 – содержание оксида алюминия в алюминатном (а.р.) и обратном (о.р.) растворах, г/дм³; m – масса навески бокситового концентрата, г.

²Дубовиков О.А. Термохимическое кондиционирование состава низкокачественных бокситов и их переработка щелочными способами: дис. д-ра техн. наук: 05.16.02. СПб, 2012. 319 с. / Dubovikov O.A. Thermochemical conditioning of low-quality bauxite composition and their processing by alkaline methods: Doctoral Dissertation in Technical Sciences: 05.16.02. St. Petersburg, 2012. 319 p.

³ГОСТ 23201.1-78 Глинозем. Методы спектрального анализа. Определение диоксида кремния, оксида железа, оксида натрия и оксида магния / GOST 23201.1-78 Alumina. Methods of spectral analysis. Determination of silicon dioxide, iron oxide, sodium oxide and magnesium oxide

На рис. 1 представлена графическая зависимость степени извлечения оксида алюминия от дозировки оксида кальция на стадии байеровского выщелачивания.

Из уравнения регрессии нашли оптимальное значение для дозировки оксида кальция, которая составила 2,5% от навески бокситового концентрата, при этом извлечение оксида алюминия из бокситового концентрата в алюминатный раствор составило 90,28% (или 98,80% от теоретически возможного извлечения). Сопоставление результатов по твердой и жидкой фазам позволяет говорить о возможности применения экспресс-анализа.

При анализировании проб в способе термохимия-Байер на содержание общей и каустической щелочи, диоксида кремния и оксида алюминия наиболее распространенными являются следующие методы:

прямого и обратного титрования, определения оптической плотности с использованием спектрофотометра^{4,5}.

Методом нейтрализации проводят количественное определение кислот, оснований, солей, имеющих в растворе кислую или щелочную реакцию и ряда других соединений. Различают ацидиметрическое титрование, в котором в качестве титранта используют растворы серной или соляной кислоты, и алкалиметрическое титрование, где титрантом служат, как правило, растворы гидроксида калия или натрия⁶.

Методика определения общей и каустической щелочи во многом схожи³. Разница заключается лишь в том, что определению каустической щелочи предшествует осаждение карбонат- и сульфат-ионов. Титруя раствор в присутствии фе-

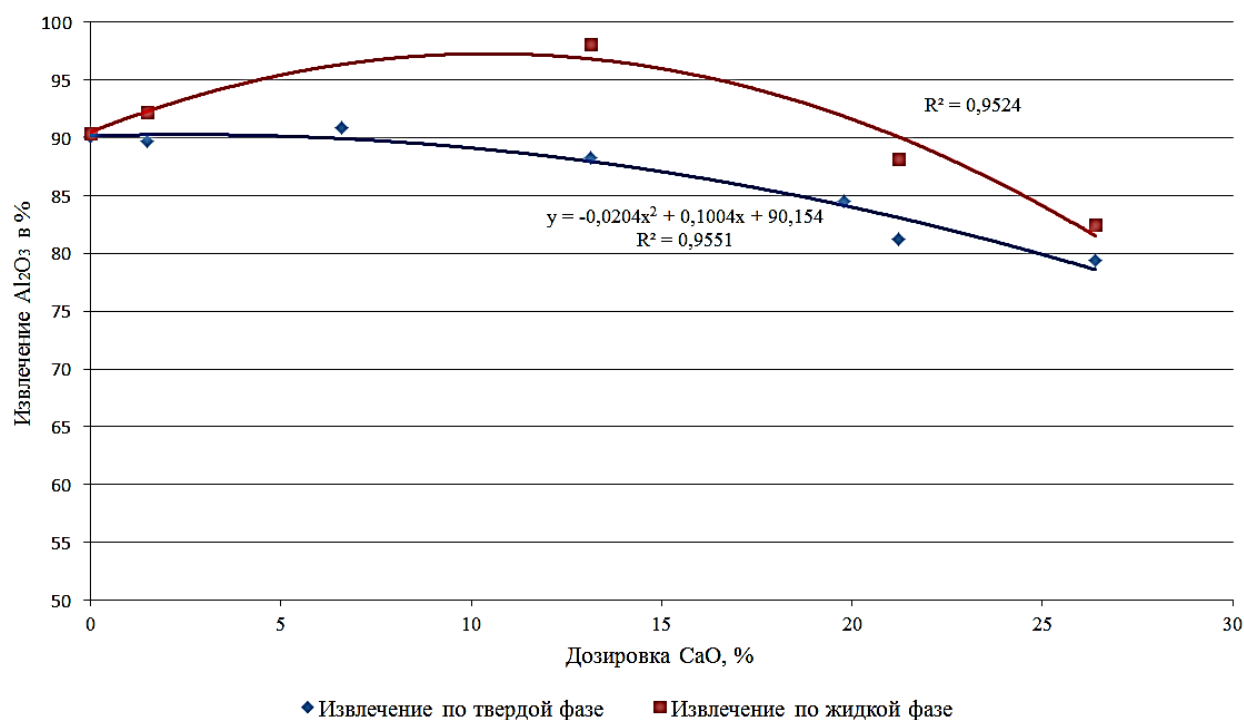


Рис. 1. Извлечение Al_2O_3 (%) по твердой и жидкой фазе в зависимости от дозировки CaO
Fig. 1. Al_2O_3 (%) extraction in solid and liquid phase depending on CaO dosage

⁴ГОСТ 2642.4-97 Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения оксида алюминия (с Поправкой) / GOST 2642.4-97 Refractories and refractory raw materials. Methods for determination of aluminum oxide (Corrected)

⁵ГОСТ 2642.3-97 Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения диоксида кремния / GOST 2642.3-97 Refractories and refractory raw materials. Determination methods of silicon dioxide

⁶Янсон Э.Ю., Путнин Я.К. Теоретические основы аналитической химии: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 172 с. / Janson E.Yu., Putnin Ya.K. Theoretical foundations of analytical chemistry: Textbook for universities. M.: Higher School, 1980, 172 p.



нолфталеина 0,1N раствором соляной кислоты, малиновая окраска раствора обесцвечивается в момент нейтрализации едкого натра, свободного и связанного с алюминием.

Исходя из стехиометрии реакции нейтрализации щелочи, соляной кислотой можно получить формулу для определения концентрации щелочи:

$$[Na_2O] = \frac{V \cdot T \cdot W \cdot 1000}{a \cdot b_1}, \quad (3)$$

где $[Na_2O]$ – определяемая концентрация щелочи в алюминатном растворе, г/дм³; V – объем титранта, пошедшего на анализ, мл; T – титр щелочи по соляной кислоте, равный $3,1 \cdot 10^{-3}$ г/см³; W – объем мерной колбы, используемый для разбавления, см³; a – аликвота, взятая на анализ из исходного раствора, см³; b_1 – аликвота, взятая на анализ после разведения, см³.

Метод обратного комплексонометрического титрования основан на том, что отсутствует подходящий индикатор, избирательно окрашиваемый в присутствии алюминия. Поэтому к алюминатному раствору добавляется избыток трилона Б, который связывает алюминий в комплекс с сохранением естественной окраски вводимого индикатора. Чаще всего в качестве индикатора используют ксиленовый оранжевый, который с катионами металлов образует комплексы красного цвета. При титровании избытка трилона раствором азотнокислого цинка в точке эквивалентности раствор изменяет окраску – с желтого на красный. Количество закомплексованного алюминия трилоном Б определяется по разности.

$$[Al_2O_3] = \frac{(V_{Tp.Б.} - k \cdot V) \cdot T \cdot W \cdot 1000}{a \cdot b_2}, \quad (4)$$

где $[Al_2O_3]$ – определяемая концентрация оксида алюминия в алюминатном растворе, г/дм³; $V_{Tp.Б.}$ – объем трилона Б, см³; k – по-

правочный коэффициент, определяемый экспериментально для каждого раствора азотнокислого цинка; V – объем титранта, см³; T – титр оксида алюминия по азотнокислоте, равный $2,55 \cdot 10^{-3}$ г/см³; W – объем мерной колбы, используемый для разбавления, см³; a – аликвота, взятая на анализ из исходного раствора, см³; b_2 – аликвота, взятая на анализ после разведения, см³.

Метод спектрофотометрического определения кремнекислоты в алюминатных растворах основан на образовании кремнемолибденовой кислоты и ее последующего восстановления аскорбиновой кислотой. Окраска комплексного соединения переходит из желтой в синюю. Анализ окрашенного раствора производят на спектрофотометре («Промэколаб ПЭ Уф», Россия) при монохроматическом излучении $\lambda = 815$ нм. Для построения градуировочного графика используется набор растворов с известной концентрацией и определяется зависимость оптической плотности как функции $D = f([SiO_2])^3$.

Для экспериментальной части работы был построен градуировочный график (рис. 2) на основании следующих концентраций кремнекислоты: 0,0001, 0,0002, 0,0005, 0,001, 0,002.

С использованием функциональной зависимости концентрация диоксида кремния в исследуемом растворе определяется по формуле:

$$[SiO_2] = \frac{D \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot W \cdot 1000}{a \cdot b_3}, \quad (5)$$

где $[SiO_2]$ – определяемая концентрация диоксида кремния в алюминатном растворе, г/дм³; D – оптическая плотность; $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона, равный отношению концентрации диоксида кремния к оптической плотности на градуировочной кривой; W – объем мерной колбы, используемый для разбавления, см³; a – аликвота, взятая на анализ из исходного раствора, см³; b_3 – аликвота, взятая на анализ после разведения, см³.

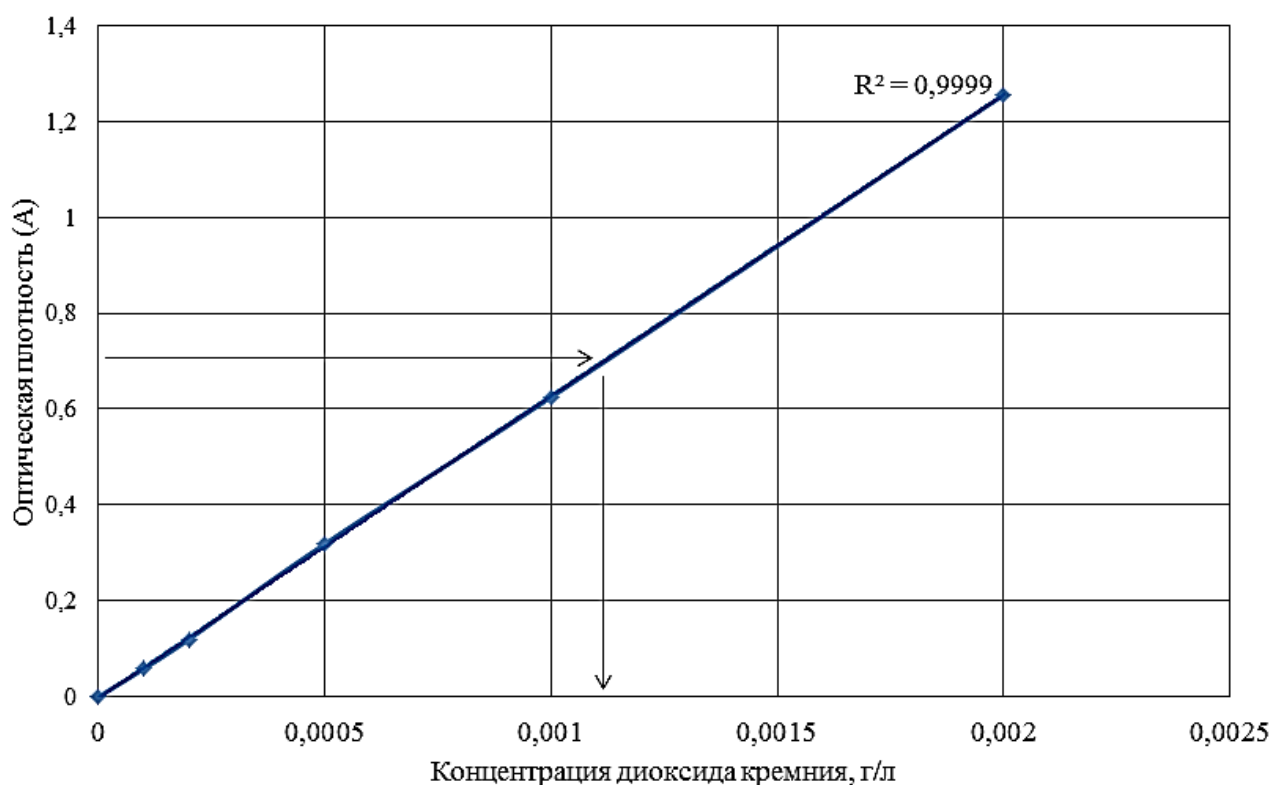


Рис. 2. Градуировочный график для определения содержания диоксида кремния в растворе
 Fig. 2. Calibration curve for determining silicon dioxide content in solution

Приведенные выше формулы, приведенные относительно произведения аликвот ($a \cdot b_i$), будут иметь вид:

$$\begin{cases} a \cdot b_1 = \frac{31 \cdot W}{[Na_2O]} & \text{— при оптимальном} \\ & \text{объеме } V = 10 \text{ см}^3; \\ a \cdot b_2 = \frac{12,5 \cdot W}{[Al_2O_3]} & \text{— при оптимальном} \\ & \text{значении } (V_{\text{трб}} - k \cdot V) = 5 \text{ см}^3; \\ a \cdot b_3 = \frac{D_{\text{ср}} \cdot \text{tg} \alpha \cdot W \cdot 1000}{[SiO_2]} & \text{— где } D_{\text{ср}} \text{ — среднее} \\ & \text{значение оптической} \\ & \text{плотности колориметра.} \end{cases}$$

Для нашего случая исходный оборотный алюминатный раствор имел концентрацию по каустической щелочи

250 г/дм³ и каустический модуль $\alpha_k = 3,5$. Обратный алюминатный раствор дозируется из расчета получения $\alpha_k = 1,65$, что соответствует концентрации оксида алюминия, равной 250 г/дм³. Содержание диоксида кремния в алюминатных растворах после выщелачивания колеблется в пределах от 0 до 5 г/дм³.

Таким образом, подставляя данные значения в приведенную выше систему уравнений, получим значения ($a \cdot b_i$) для выбранной колбы разведения. Это позволит отбирать из нее соответствующие аликвоты (b_i), отобрав из алюминатного раствора аликвоту (a) и переводя ее в колбу разведения.

Результаты исследований и их обсуждение

Разработана методика экспресс-анализа качества бокситового концентрата по составу жидкой фазы, полученной после его гидрометаллургической переработки, позволяющая упростить ход анализа алюминатных растворов на содержание Al_2O_3 ,

SiO_2 и Na_2O . За счет отбора одной исходной аликвоты и последующего ее разведения (для получения соответствующих аликвот на каждый из анализируемых компонентов) можно упростить и ускорить проведение анализа.



Изучено влияние ввода добавки оксида кальция на процесс выщелачивания в способе термохимия-Байер. Оптимальная

дозировка CaO, обеспечивавшая максимальное извлечение Al_2O_3 (98,8% от теоретически возможного), составила 2,5%.

Библиографический список

1. Xiao J., Fachuang L., Zhong Q., Bao H., Wang B., Huang J., Zhang Y. Separation of aluminum and silica from coal gangue by elevated temperature acid leaching for the preparation of alumina and SiC // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 155. P. 118–124.
2. Гришин Н.Н., Иванова А.Г. Переработка кианитового концентрата из руды Кейвского месторождения для получения глинозема // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН XIV Всерос. конф. с междунар. участием (г. Апатиты, 3–4 апреля, 2017 г.). Апатиты, 2017. С. 223–226.
3. Римкевич В.С., Еранская Т.Ю., Леонтьев М.А., Гиренко И.В. Разработка фторидного гидрохимического метода обогащения каолиновых концентратов // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 9. Ч. 9. С. 2023–2027.
4. Sizyakov V.M., Bazhin V.Y., Sizyakova E.V. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite // *Metallurgist*. 2016. Vol. 59(11). P. 1135–1141.
5. Scarsella A., Rothenfluh T. Переработка алюмосиликатов с целью получения глинозема // Цветные металлы и минералы – 2016: сб. тезисов докладов VIII Междунар. конгресса (Красноярск, 13–16 сентября, 2016 г.). Красноярск, 2016. С. 46–47.
6. Римкевич В.С., Пушкин А.А., Чурушова О.В. Комплексная переработка нефелиновых концентратов гидрохимическим методом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 8. С. 346–359.
7. Арсентьев В.А., Герасимов А.М., Мезенин А.О. Исследование технологии обогащения каолинов с использованием гидротермального модифицирования // *Обогащение руд*. 2017. № 2. С. 3–9.
8. Shemi A., Ndlovu S., Sibanda V., van Dyk L. D. Extraction of alumina from coal fly ash using leach-sinter-acid leach technique // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 157. С. 348–355.
9. Dubovikov O.A., Brichkin B.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina // *Non-ferrous metals*. 2018. No. 2. P. 11–16.
10. Lawson D., Rijkeboer A., Dajkovich D., Jackson M., and Lawrence H. Approaches to the Processing of Ja-

- maican Bauxite with High Goethite Content // *Light Metals*. 2014. P. 11–18.
11. Yin J., Han M., Yang W., An J., Zhou X., Xia W., and Huang L. Roasting Pretreatment of High-Sulfur Bauxite with Low-Median Grade in Chongqing China // *Light Metals*. 2015. P. 11–14.
12. Бажин В.Ю., Федоров С.Н. Концепция развития производства алюминиевых сплавов из кианитовых руд // Теоретические и практические проблемы развития современной науки: сборник материалов 6 Междунар.-практ. конф. (г. Махачкала, 30 ноября, 2014 г.). Махачкала, 2014. Ч. 2. С. 52–55.
13. Валеев Д.В., Лайнер Ю.А., Михайлова А.Б., Куцев С.В., Коломиец Т.Ю., Шамрай В.Ф. Разложение бемит-каолиновых бокситов соляной кислотой с применением предварительного обжига // *Перспективные материалы*. 2015. № 4. С. 61–67.
14. Пат. 2478574, Российская Федерация, МПК C01F 7/06 (2006.01). Способ получения оксида алюминия из средне- и низкосортного боксита / Джу С., Йин Д., Ли К., Лиу К., Ву Д. № 2010104624/05; заявл. 21.12.2007; опубл. 10.04.2013.
15. Чернышов В.Б., Кырчиков А.В., Власова О.С., Побединская О.П. Совершенствование аппаратного оформления процесса автоклавного выщелачивания // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы VI Междунар. интерактивной науч.-практ. конф., (г. Екатеринбург, 15–18 декабря 2014 г.). Екатеринбург, 2015. С. 155–158.
16. Александров А.В., Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Разработка аналитической методики оценки качества нефелинового спека // *Технология металлов*. 2017. № 7. С. 42–48.
17. Сизяков В.М., Дубовиков О.А., Логинов Д.А. Теория и практика термохимического обогащения низкоккачественных бокситов // *Обогащение руд*, 2014. № 5 (353). С. 10–17.
18. Логинова И.В., Лоскутова А.И. Способ комплексной переработки высококремнистых бокситов // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интерактивной науч.-практ. конф. (г. Екатеринбург, 17–21 декабря 2013 г.). Екатеринбург, 2013. С. 59–61.

References

1. Xiao J., Fachuang L., Zhong Q., Bao H., Wang B., Huang J., Zhang Y. Separation of aluminum and silica from coal gangue by elevated temperature acid leaching for the preparation of alumina and SiS. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 155, pp. 118–124.
2. Grishin N.N., Ivanova A.G. *Pererabotka kianitovogo koncentrata iz rudy Kejvskogo mestorozhdeniya dlya*

polucheniya glinozema [Processing of kyanite concentrate from Kievskoe deposit ore for alumina production]. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNC RAN XIV Vserossiyskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the Fersmanovskaya scientific session of the State Institute of Science and Technology KSC RAS XIV All-Russia conference with international

participation, Apatity, 3-4 April, 2017]. Apatity, 2017, pp. 223–226. (In Russ.).

3. Rimkevich V.S., Eranskaya T.Yu., Leont'ev M.A., Girenko I.V. Development of fluoride hydrochemical concentration method for kaolin concentrates. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014, no. 9, part. 9, pp. 2023–2027. (In Russ.).

4. Sizyakov V.M., Bazhin V.Y., Sizyakova E.V. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite. *Metallurgist*, 2016, vol. 59(11), pp. 1135–1141.

5. Scarsella A., Rothenfluh T. *Pererabotka alyumosilikatov s cel'yu polucheniya gliozema* [Aluminosilicate processing for alumina production]. *Cvetnye metally i mineraly – 2016: sbornik tezisov dokladov VIII Mezhdunarodnogo kongressa* [Non-ferrous metals and minerals - 2016: Collection of report abstracts of VIII International Congress, Krasnoyarsk, 13–16 September, 2016]. Krasnoyarsk, 2016, pp. 46–47. (In Russ.).

6. Rimkevich V.S., Pushkin A.A., Churushova O.V. Complex processing of nepheline concentrates by hydrochemical method. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Institute of Geology and Nature Management of Far Eastern Branch of Russia Academy of Sciences], 2016, no. 8, pp. 346–359. (In Russ.).

7. Arsent'ev V.A., Gerasimov A.M., Mezenin A.O. Kaolines beneficiation technology study with application of hydrothermal modification. *Obogashchenie rud* [REC «Mekhanobr-Tekhnika»], 2017, no. 2, pp. 3–9. (In Russ.).

8. Shemi A., Ndlovu S., Sibanda V., van Dyk L. D. Extraction of alumina from coal fly ash using leach-sinter-acid leach technique. *Hydrometallurgy*, 2015, vol. 157, pp. 348–355.

9. Dubovikov O.A., Brichkin B.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina. *Non-ferrous metals*, 2018, no. 2, pp. 11–16.

10. Lawson D., Rijkeboer A., Dajkovich D., Jackson M., and Lawrence H. Approaches to the Processing of Jamaican Bauxite with High Goethite Content. *Light Metals*, 2014, pp. 11–18.

11. Yin J., Han M., Yang W., An J., Zhou X., Xia W., and Huang L. Roasting Pretreatment of High-Sulfur Bauxite with Low-Median Grade in Chongqing China. *Light Metals*, 2015, pp. 11–14.

12. Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. *Koncepciya razvitiya*

proizvodstva alyuminievykh splavov iz kyanitovykh rud [Development concept of aluminum alloy production from kyanite ores]. *Teoreticheskie i prakticheskie problemy razvitiya sovremennoj nauki: sbornik materialov 6 Mezhdunarodnoj-prakticheskoy konferencii* [Theoretical and practical problems of modern science development: Proceedings of 6 International Conference, Mahachkala, 30 November, 2014]. Mahachkala, 2014, part. 2, pp. 52–55. (In Russ.).

13. Valeev D.V., Lajner Yu.A., Mihajlova A.B., Kucev S.V., Kolomic T.Yu., Shamraj V.F. Decomposition of boehmite-kaolin bauxites by hydrochloric acid using preliminary calcination. *Perspektivnye materialy* [Baikov Institute of Metallurgy and Materials Sciences RAS], 2015, no. 4, pp. 61–67. (In Russ.).

14. Dzhur S., Jin D., Li K., Liu K., Vu D. *Sposob polucheniya oksida alyuminiya iz sredne- i nizkosortnogo boksita* [Method of aluminum oxide production from medium-and low-grade bauxite]. Patent RF, no. 2478574, 2013.

15. Chernyshov V.B., Kyrchikov A.V., Vlasova O.S., Pobedinskaya O.P. *Sovershenstvovanie apparatnogo oformleniya processa avtoklavnogo vyshchelachivaniya* [Improving hardware design of autoclave leaching]. *Materialy VI Mezhdunarodnoj interaktivnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Innovacii v materialovedenii i metallurgii"* [Proceedings of VI International interactive scientific and practical conference "Innovations in materials science and metallurgy", Ekaterinburg, 15–18 December 2014]. Ekaterinburg, 2015, pp. 155–158. (In Russ.).

16. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V., Tyutrin A.A. Development of analytical methodology for quality estimation of nepheline cake. *Metal Technology*. 2017, no. 7, pp. 42–48. (In Russ.).

17. Sizyakov V.M., Dubovikov O.A., Loginov D.A. lower grade bauxite thermo-chemical processing theory and practice. *Obogashchenie rud*. 2014, no. 5, pp. 10–26. (In Russ.).

18. Loginova I.V., Loskutova A.I. *Sposob kompleksnoj pererabotki vysokokremnistykh boksitov* [Method of complex processing of high-silicon bauxites]. *Materialy III Mezhdunarodnoj interaktivnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Innovacii v materialovedenii i metallurgii"* [Proceedings of III International Interactive scientific and practical conference "Innovations in materials science and metallurgy", Ekaterinburg, 17–21 December 2013]. Ekaterinburg, 2013, pp. 59–61. (In Russ.).

Критерии авторства

Рис А.Д., Сундуров А.В., Дубовиков О.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Ris A.D., Sundurov A.V., Dubovikov O.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рис Александра Дмитриевна,
аспирант;
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, о-в Васильевский,
21 линия, 2, Россия;
e-mail: kasandraspb@yandex.ru

Сундуrow Александр Владимирович,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, о-в Васильевский,
21 линия, 2, Россия;
e-mail: sav.66@bk.ru

Дубовиков Олег Александрович,
доктор технических наук, профессор кафедры химических технологий и переработки энергоносителей,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, о-в Васильевский,
21 линия, 2, Россия;
e-mail: dubovikov_oa@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandra D. Ris,
Postgraduate student,
St. Petersburg mining University,
21 lines, 2, Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106,
Russia;
e-mail: kasandraspb@yandex.ru

Aleksandr V. Sundurov,
Postgraduate student,
St. Petersburg mining University,
21 lines, 2, Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106,
Russia;
e-mail: sav.66@bk.ru

Oleg A. Dubovikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Chemical Technologies and Energy Carrier Processing,
St. Petersburg mining University,
21 lines, 2, Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106,
Russia;
e-mail: dubovikov_oa@mail.ru



О влиянии флокулянтов на кинетику процессов обезвоживания и промывки красных шламов из низкокремнистых бокситов при производстве глинозема

© О.В. Саламатов*, В.И. Саламатов**

*Восточно-Сибирский АО «Север Минералс», г. Иркутск, Россия

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

Резюме: Цель – изучение влияния флокулянтов на кинетику процессов сгущения и промывку красных шламов, полученных из низкокремнистых бокситов при производстве глинозема. Для исследования кинетики процесса сгущения пульпы красных шламов использовалась методика контроля уровня пульпы в ходе процесса отстаивания. В ходе исследования декантационной противоточной промывки была применена методика декантов с убывающими концентрациями. Приготовление растворов флокулянтов проводилось по определенной методике, позволяющей получать рабочие растворы флокулянтов, оказывающих максимальный эффект на процесс осветления пульпы красных шламов (высокое значение скорости осветления, низкое содержание дисперсных частиц в сливе). Изучено влияние флокулянтов на кинетику процессов сгущения и промывки красных шламов, полученных из низкокремнистых бокситов. Установлено, что флокулянты влияют на процесс формирования зон сгущения. Замечено, что в равной степени как для пульп обработанных, так и необработанных реагентами, изoeлектрическое состояние наблюдается при определенной концентрации щелочного алюминатного или щелочного раствора, соответствующего максимальной скорости осветления (максимальной производительности сгустителя и сгустителя-промывателя). Применение флокулянтов на стадии сгущения обеспечивает в последующем рост производительности промывателей по ступеням промывки. При этом максимальная производительность отмечается для того промывателя, в котором концентрация растворенного ценного вещества соответствует или близка к концентрации изoeлектрического состояния. При этом сгуститель-промыватель обеспечивает осветленный раствор с минимальным содержанием дисперсных частиц. Установлено, что применение флокулянтов влияет на процесс формирования, протяженность основных зон сгущения. В статистических условиях осаждения сфлуктурированных пульп наблюдается уменьшение глубины осветленной зоны, значительное развитие получает переходная зона. Аналогичное влияние флокулянтов отмечено для всех ступеней противоточной декантационной промывки красных шламов в условиях, когда наблюдается уменьшение концентрации растворенного ценного вещества (алюминатного раствора) от первой к последней ступени промывки.

Ключевые слова: производство глинозема, бокситы, красный шлам, флокуляция, промывка, декантация, алюминатные растворы

Информация о статье: Дата поступления 23 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Саламатов О.В., Саламатов В.И. О влиянии флокулянтов на кинетику процессов обезвоживания и промывки красных шламов из низкокремнистых бокситов при производстве глинозема. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 404–414. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-404-414.

To flocculant effect on the kinetics of dewatering and washing processes of red muds from low silicon bauxites in alumina production

O.V. Salamatov, V.I. Salamatov

East-Siberian Branch of Sever Minerals JSC, Irkutsk, Russia

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to study the effect of flocculants on the kinetics of thickening and washing processes of red muds obtained from low silicon bauxites in the production of alumina. To study the kinetics of red mud slurry thickening the method of controlling the pulp level during the settling process is used. The method of decants with decreasing

concentrations is applied in the study of decanting countercurrent washing. The flocculant solutions are prepared according to a certain method, which allows to obtain working solutions of flocculants that have the maximum effect on red mud slurry clarification (high clarification rate, low content of dispersed particles in the drain). The effect of flocculants on the thickening and washing kinetics of red muds obtained from low silicon bauxites is studied. It has been determined that flocculants influence the formation of thickening zones. It is noticed that, the isoelectric state is equally observed for both pulps treated and non-treated with reagents at a certain concentration of alkaline aluminate or alkaline solution corresponding to the maximum clarification rate (maximum productivity of the thickener and thickener-washer). The use of flocculants at the stage of thickening ensures the subsequent increase in the performance of washers in washing stages. The maximum performance is demonstrated by the washer where the concentration of the dissolved valuable substance corresponds or is close to the concentration of the isoelectric state. In this case, the thickener-washer provides a clarified solution with a minimum content of dispersed particles. It has been found out that the use of flocculants influences the formation and the length of the main thickening zones. Under statistical conditions of flocculated pulp deposition, a decrease in the clarified zone depth is observed whereas the transition zone is significantly developed. A similar effect of flocculants has been noted for all stages of countercurrent decanting washing of red mud in the conditions when the concentration of the dissolved valuable substance (aluminate solution) decreases from the first to the last stage of washing.

Keywords: alumina production, bauxites, red mud, flocculation, washing, decantation, aluminate solutions

Information about the article: Received December 23, 2018; accepted for publication March 12, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Salamatov O.V., Salamatov V.I. To flocculant effect on the kinetics of dewatering and washing processes of red muds from low silicon bauxites in alumina production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 404–414. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-404-414.

Введение

В алюминиевой промышленности производство глинозема является необходимым этапом производства алюминия. Глинозем получают различными способами в зависимости от состава и свойств исходного сырья. Эти способы можно разделить на щелочные, кислотные и комбинированные [1]. В настоящее время практически весь глинозем получают щелочными способами – гидрохимическими, термическими и комбинированными. Наиболее широкое применение нашел гидрохимический способ Байера. Этим способом перерабатывают высококачественные бокситы с относительно невысоким содержанием растворенного в щелочном растворе кремнезема. Бокситы, перерабатываемые по этому способу, имеют высокий кремниевый модуль (не менее 6–7) и не содержат больших количеств серы и двуокиси углерода.

В глиноземном производстве красные шламы составляют большинство отходов [2]. Проблема их переработки является достаточно актуальной задачей [3, 4]. В этом направлении проводятся исследования, позволяющие определить пути наиболее эффективной их переработки [5, 6].

В обычных условиях пульпы красных

шламов характеризуются медленным осветлением в сгустителях, что объясняется тонкодисперсным состоянием шламов, их агрегативной устойчивостью, высокой степенью гидратации, свойствами жидкой фазы пульпы (удельный вес и вязкость).

Практике известны различные способы интенсификации процессов обезвоживания и промывки красных шламов (механические, электрокинетические, теплофизические и др.). Одним из эффективных способов интенсификации процессов обезвоживания красных шламов является обработка пульп высокомолекулярными соединениями (флокулянтами) [1].

В производственных условиях в процессе обезвоживания и промывки красных шламов применяют гидрофильные коллоиды: на отечественных заводах – ржаную муку, на зарубежных – крахмал. Значительные возможности при этом представляет использование синтетических высокомолекулярных веществ (полиакриламида, се дипура, алклара и др.). Преимущество синтетических флокулянтов заключается в увеличении скорости осаждения шлама почти в 3–10 раз по сравнению с ржаной мукой, при этом расход флокулянтов на порядок



меньше. Так на заводе «Уральский Алюминиевый Завод» применялась мука (расход 0,7–3 кг на 1 тонну глинозема). Сейчас на заводе используют флокулянты фирмы Суперфлок серии НХ-30, а на промывке шлама «Сайтек» № 1229.

На заводе по производству алюминия г. Тулча (при переработке бокситов Сьерра-Леоне) применяют при сгущении красного шлама флокулянты НХ-600 (скорость 14–17 м/час) [7]. На промывке для первых 4 промывателей используют флокулянт с кодом № 9779 (150 г/т сухого шлама). На последней ступени промывки для глубокого промывателя используют флокулянт, именуемый AL69EVH (дозировка 250 г/т шлама).

Коллективом авторов [8] предложен в качестве флокулянта статический сополимер метилметакрил (расход 0,005–0,016 кг/т пульпы). При этом показано, что сочетание муки и сополимера положительно сказывается на производительности промывателя.

Институтом высокомолекулярных соединений РАН [9] в целях интенсификации процессов отстаивания тонких суспензий предложена полиакриловая кислота в каче-

стве высокомолекулярного флокулянта-осадителя.

Молекулярная масса синтетических флокулянтов колеблется от 0,5 до 2,106. Исследования показывают, что с увеличением молекулярной массы эффективность действия флокулянтов повышается. В настоящее время выпускают большое число неионогенных, анионных и катионных синтетических и органических высокомолекулярных флокулянтов.

Флокулянты принадлежат к классу линейных полимеров, для которых характерна цепочная форма макромолекул. Они весьма чувствительны к внешним воздействиям, легко разрушаются с образованием микромолекул меньших размеров. Растворение высокомолекулярных веществ в воде протекает медленно. Вначале происходит набухание полимера, а затем образование однородного раствора в результате взаимной диффузии молекул воды и макромолекул полимера. Их флокулирующее действие основано на адсорбции макромолекул на поверхности твердой фазы частиц, в результате чего наблюдается соединение частиц во флокулы.

Цель исследования

Целью исследований являлось изучение влияния флокулянтов на кинетику процессов сгущения и промывки красных

шламов, получаемых из низкокремнистых бокситов.

Методика исследования

Исследование декантационной противоточной промывки проводилось по следующей методике. В каждом случае использовали деканты с убывающими концентрациями, полученными в ходе промывки. Мерные цилиндры, число которых соответствовало числу ступеней промывки, заполняли исходной суспензией. В этих цилиндрах суспензия отстаивалась. После уплотнения твердой фазы до постоянного объема проводилась декантация маточного раствора из всех цилиндров. Затем в первый цилиндр заливалась вода до первоначального уровня суспензии. Содержание цилиндра

взбалтывали в течение времени, достаточного для выравнивания концентрации растворенного вещества во всем объеме жидкой фазы суспензии и снова оставляли для отстаивания. После вторичного уплотнения осадка до постоянного объема проводили декантацию раствора.

Декантированный раствор заливали во второй цилиндр и перемешивали с влажным осадком. После того, как осадок уплотнится до постоянного объема, раствор из второго цилиндра декантируют и заливают в третий цилиндр. К осадку второго цилиндра

добавляют воду до уровня исходной суспензии. Содержимое обоих цилиндров (второго и третьего) взбалтывают и ставят на отстаивание. Затем из третьего цилиндра раствор декантируют в четвертый, а из второго – в третий цилиндр. Таким способом осуществляется промывка осадка во всех цилиндрах растворами убывающих концентраций.

В целях интенсификации процесса осветления пульпы красных шламов синтетические высокомолекулярные флокулянты применялись в виде водных растворов концентрацией от 0,05 до 0,5% по основному веществу. Верхний предел концентрации флокулянтов ограничен вязкостью раствора, а нижний – требованиями минимального обводнения процесса. Предпочтительным яв-

ляется интервал (0,1–0,25 %) при одинаковом расходе по твердому (Ж:Т). Ухудшение показателей процесса при применении концентрированных растворов флокулянта может быть объяснено тем, что в таких растворах возникают надмолекулярные образования (пачки) в результате ассоциации макромолекул полимера, которые недостаточно активны. С другой стороны, при этом затрудняется гидролиз его макромолекул с образованием активных в сорбционном отношении групп анионов.

В сильно разбавленных водных растворах флокулянты находятся в молекулярной и ионной формах. При этом макромолекулы полимера проявляют тенденцию к свертыванию, что также снижает его флокулирующие свойства.

Результаты исследования

Для проведения эксперимента использовали пульпы красных шламов, содержащих $60 + 0,5$ г/дм³ твердого и 130 г/дм³ Na_2O_K , которые приготавливали из сгущенной пульпы.

Отстаивание шлама проводили в медных цилиндрах объемом 100 мл при температуре 96–98°C. После заполнения цилиндра нагретой пульпой и добавления в пульпу заданного количества флокулянта, цилиндр дважды переворачивали и помещали в воздушный термостат, где температура в указанных пределах поддерживалась автоматически. Одновременно с этим включали секундомер и через определенные промежутки времени производили отчеты высот осветленного столба пульпы. Содержание твердого в пульпе позволяет достаточно быстро при перемешивании распределить флокулянт, при этом оптимальное время перемешивания составляет в среднем 2 мин [10, 11]. Излишнее перемешивание приводит к разрушению флокул. При избыточной концентрации дисперсной фазы труднее равномерно распределить флокулянт во всем объеме, при этом расход флокулянта будет увеличиваться. Как правило, при росте количества дисперсной фазы увеличивается дозировка флокулянта для того,

чтобы обеспечить равную скорость осветления. Это объясняется тем, что адсорбция флокулянта поверхностью твердых частиц происходит очень быстро и является необратимым процессом. Все это может привести к снижению активности флокулянта. Поэтому в суспензии, особенно с высоким содержанием твердой фазы, может оказаться недостаточно молекул полимера для флокуляции всех частиц твердой фазы [12, 13]. В то же время на процесс флокуляции значительное влияние оказывает температура [13]. При ее снижении уменьшается скорость диффузии и скорость адсорбции в соответствии с законом Аррениуса, образуются более мелкие флокулы. По данным опыта строили кривые седиментации, на основании которых вычисляли скорость оседания пульпы.

На рис. 1 приведены такие кривые седиментации в зависимости от концентрации щелочи без добавки (а) и с добавкой (b) флокулянта полиакриламида (ПАА).

Из приведенных кривых видно, что они состоят из прямолинейных и криволинейных участков, характеризующих зоны свободного оседания и уплотнения пульпы. В соответствии с этим, скорость оседания пульпы рассчитывали из величины участков

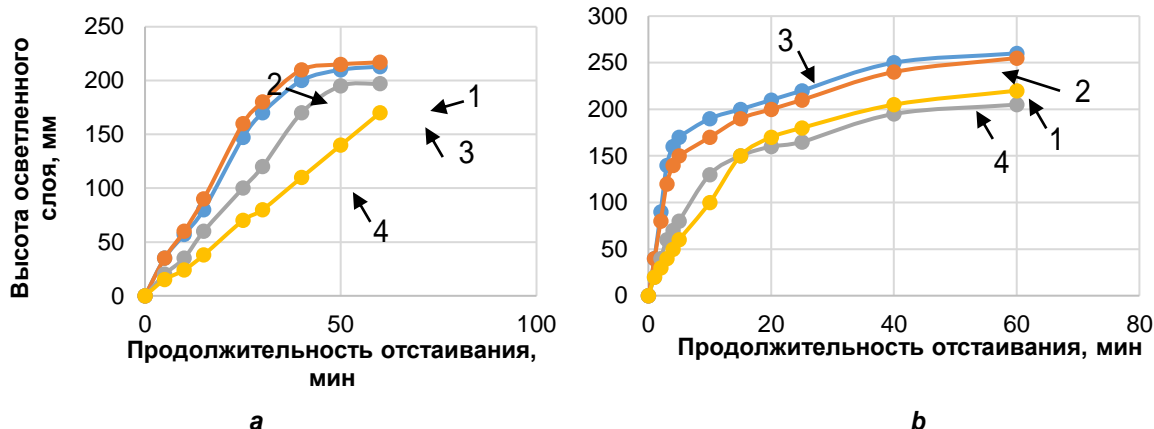


Рис. 1. Кривые седиментации пульпы красного шлама АО «Алюминий Казахстана» в зависимости от концентрации щелочи при температуре 96–98°C без добавки (а) и с добавкой (б) (флокулянта полиакриламида при различной концентрации щелочи: а – 1-1, 85; 2-10; 3-80; и 4-140 г/дм³ Na₂O_к; б – 1-1, 85; 2-10; 3-20 и 4-100 г/дм³ Na₂O_к)

Fig. 1. Precipitation curves of red slurry pulp of "Kazakhstan Aluminum" JSC depending on alkali concentration at the temperature of 96–98°C without addition (a) and with the addition of (b) flocculant polyacrylamide at different concentrations of alkali: а – 1-1, 85; 2-10; 3-80; and 4-140 g/dm³ Na₂O_к b – 1-1, 85; 2-10; 3-20 and 4-100 g/dm³ Na₂O_к

кривых, отвечающих линейной зависимости между высотой осветленного столба пульпы и продолжительностью ее отстаивания по формуле:

$$W = \frac{H}{t}, \text{ мм/мин,}$$

где W – скорость осветления пульпы, мм/мин; H – высота осветленного столба пульпы в течение времени t , мм; t – продолжительность отстаивания, соответствующая прямолинейному участку кривой седиментации.

Для пульп красных шламов АО «Алюминий Казахстана» (Павлодарский алюминиевый завод), необработанных флокулянтами, ширина осветленной зоны больше, чем для пульп, обработанных флокулянтами. Так, для концентрации 1,85 г/дм³ Na₂O_к глубина осветленной зоны составляет для необработанных пульп 170 мм, а для обработанных – 140 мм, при концентрации 80 г/дм³ Na₂O_к это величина составляет 170 мм для необработанных и 120 мм для обработанных. Уменьшение глубины осветленной зоны связано со значительным развитием переходной зоны как по ширине ее развития, так и по продолжительности их

перехода в зону компрессии. Наличие более развитой переходной зоны для флокулированных пульп тем не менее сопровождается образованием зоны компрессии меньшей толщины.

Аналогичные кинетические закономерности наблюдаются в ходе противоточной промывки красных шламов ООО «Богословский Алюминиевый Завод» (ООО «БАЗ»). На рис. 2 приведены кривые (данные ранее проведенных исследований), характеризующие кинетику процесса осаждения пульп обработанных комбинированными добавками: (ПАА + мука)сг* + (1/6ПАА-опт)пр*, где *сг – сгущение; *пр – промывка. В данной схеме противоточной промывки на предварительное сгущение вводились совместно флокулянты ПАА и мука в оптимальной дозировке, а на каждой ступени промывки пульпы дополнительно обрабатывались ПАА в 1/6 оптимальной дозировки.

В работе рассмотрено влияние концентрации щелочи на устойчивость пульп красных шламов. В данном случае опыты по сгущению проводили с пульпой красного шлама, содержащих 60 и 82,5 г/дм³ твердого, в мерных цилиндрах объемом 0,5 л при температуре 20 и 96–98°C.

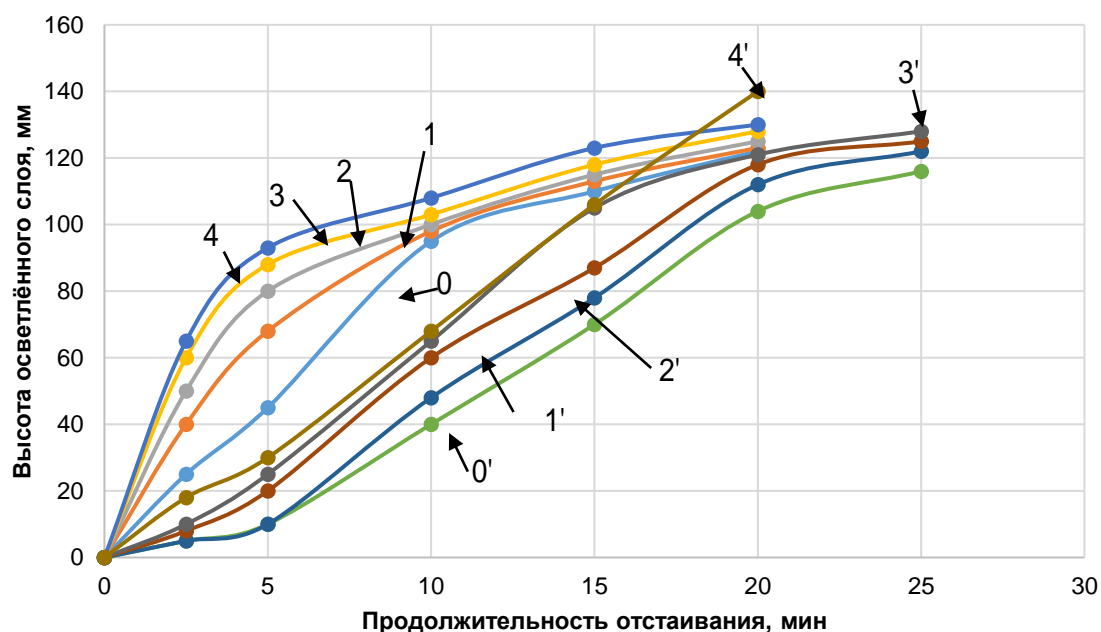


Рис. 2. Влияние комбинированных добавок (полиакриламид + мука)сг + (1/6 полиакриламида опт) на кинетику процесса сгущения и промывки (4-кратной противоточной) осадков красных шламов ООО «БАЗ»: 0; 1; 2; 3; 4 – с добавкой флокулянта (0 – сгущение, 1, 2, 3, 4 – ступени промывки); 0'; 1'; 2'; 3'; 4' – без ввода флокулянта

Fig. 2. Effect of combined additives (polyacrylamide + flour) thickened + (1/6 polyacrylamide opt) on the kinetics of thickening and washing (4-times counter-current washing) red mud precipitation of BAZ LLC: 0; 1; 2; 3; 4 – with flocculant addition (0 – thickening, 1, 2, 3, 4 – washing stages); 0'; 1'; 2'; 3'; 4' – flocculant-free

Результаты опытов по сгущению красного шлама без добавок и с добавками различных флокулянтов представлены на рис. 3, 4. Пульпы обрабатывались флокулянтами ПАА и мукой на стадии предварительного сгущения в оптимальной дозировке. Из рассмотренных кривых, характеризующих скорость осветления пульпы в зависимости от концентрации щелочи, видно, что наибольшая скорость осветления соответствует концентрации Na_2O , равной 20 г/дм^3 – полученной как с добавкой, так и без добавки флокулянта. Установлено также, что при данной концентрации щелочи получают и наиболее осветленные растворы.

Из сравнения кривых 1, 2 (см. рис. 3) видно, что применение добавок ПАА значительно ускоряет отстаивание шлама. В то же время кривые скорости осветления с добавкой и без добавки ПАА аналогичны. Это указывает на то, что влияние щелочности пульпы на коллоидные свойства частиц шлама и флокулирующие свойства ПАА, протекающих в одном и том же направле-

нии, усиливает или ослабляет их взаимодействие.

Таким образом, значительное влияние на скорость осветления шламистых пульп оказывает концентрация щелочи, при этом уменьшение ее, например, в ходе промывки, само по себе ведет к снижению вязкости, что благоприятно сказывается на производительности отстойника. С другой стороны, с изменением концентрации щелочи меняется физико-химическое состояние сорбционного слоя [14, 15]. При этом при определенной концентрации щелочи наблюдается изoeлектрическое состояние, характеризующееся наименьшей развитостью сольватной оболочки, что обуславливает максимальную скорость осветления. В итоге – в реальных условиях – кинетика процесса осаждения шламистых пульп определяется действием этих двух факторов. Такая зависимость отмечается как для обработанных, так и необработанных пульп. На рис. 5 представлены результаты исследования процесса сгущения пульп красных шла-

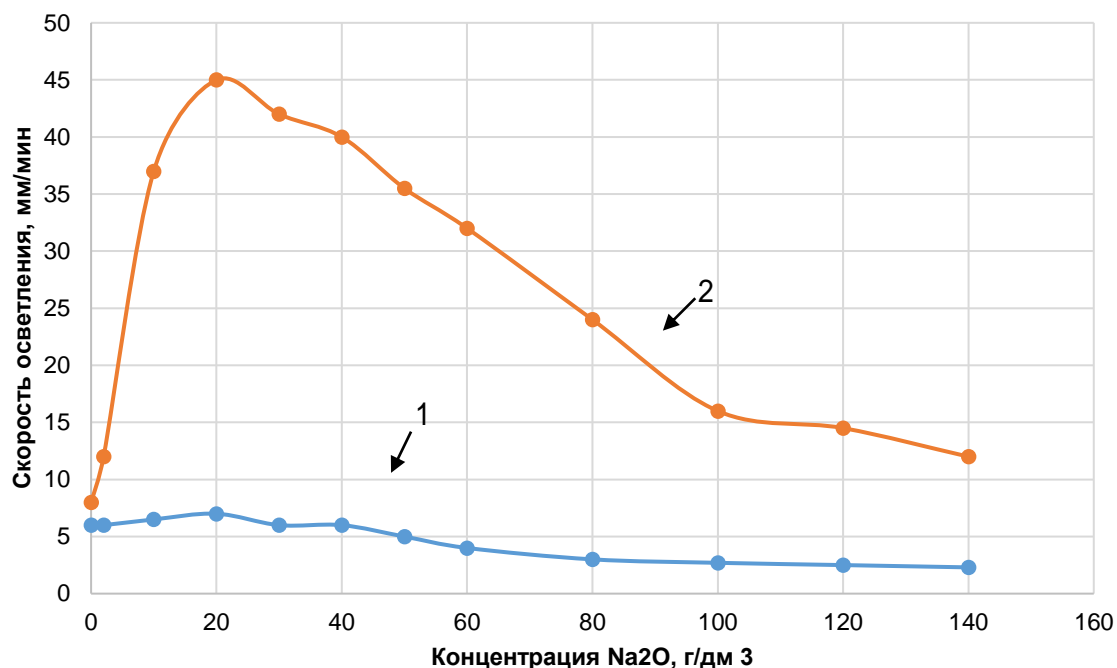


Рис. 3. Влияние концентрации щелочи на скорость осветления красного шлама при температуре пульпы 96–98°C: 1 – кривая скорости осветления пульпы без добавки флокулянта; 2 – то же с добавкой полиакриламида ($q = 25 \text{ г/дм}^3$)

Fig. 3. Effect of alkali concentration on the clarification rate of red sludge at the pulp temperature of 96–98°C: 1 – clarification rate curve of flocculant-free pulp; 2 – the same with the addition of polyacrylamide ($q = 25 \text{ g/dm}^3$)

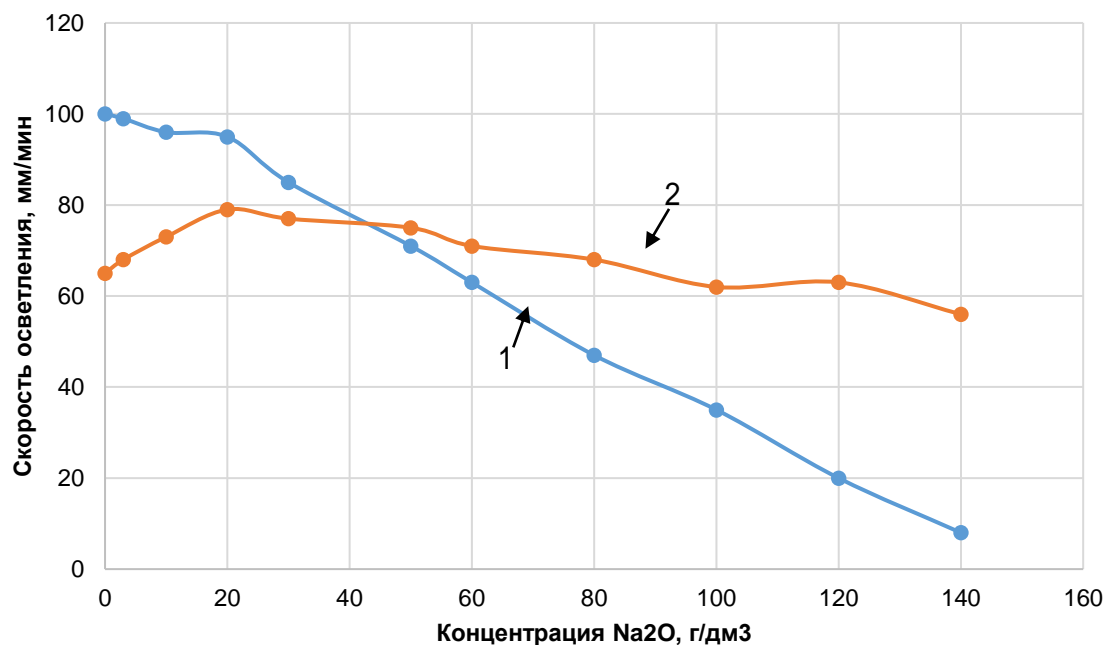


Рис. 4. Влияние концентрации щелочи на скорость осветления красного шлама при температуре пульпы 96–98°C: 1 – кривая скорости осветления пульпы с добавкой полиакриламида ($q = 25 \text{ г/дм}^3$); 2 – то же с добавкой муки ($q = 500 \text{ г/дм}^3$)

Fig. 4. Effect of alkali concentration on the red sludge clarification rate at the pulp temperature of 96–98°C: 1 – curve of clarification rate of pulp with addition of polyacrylamide ($q = 25 \text{ g/dm}^3$); 2 – the same with the addition of flour ($q = 500 \text{ g/dm}^3$)

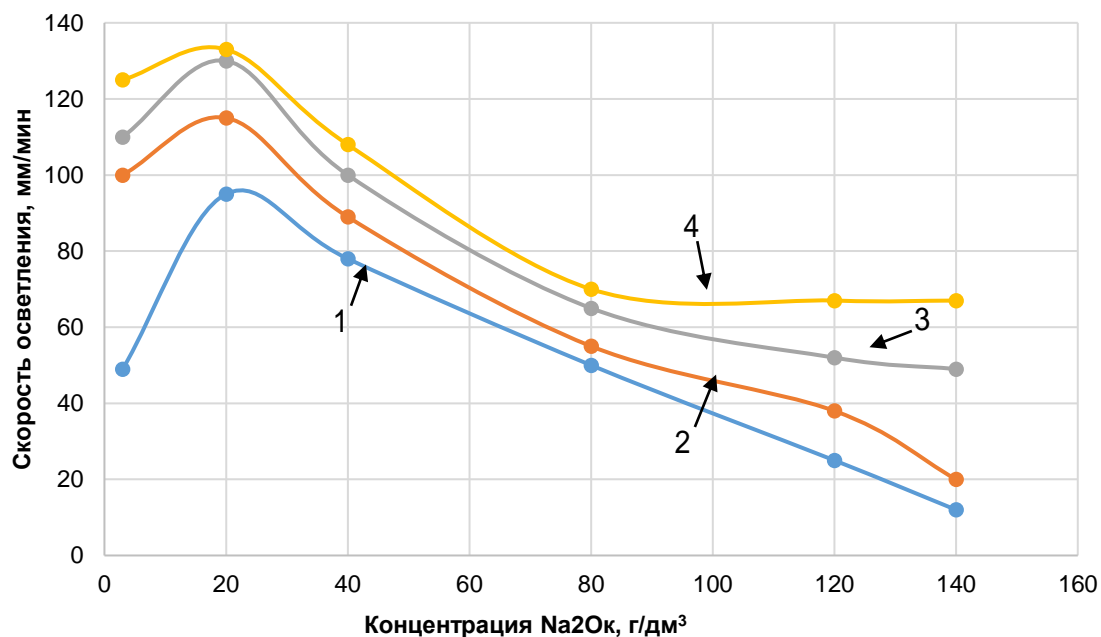


Рис. 5. Влияние концентрации Na_2O на скорость осветления красных шламов АО «Алюминий Казахстана» при разном отношении Ж:Т: 1-Ж:Т=8,4:1; 2-Ж:Т=15; 3-Ж:Т=21; 4-Ж:Т=28
 Fig. 5. Effect of Na_2O concentration on the clarification rate of red slurries of "Kazakhstan Aluminum" JSC at different ratios of L:S: 1-L:S=8.4:1; 2-L:S=15; 3-L:S=21; 4-L:S=2

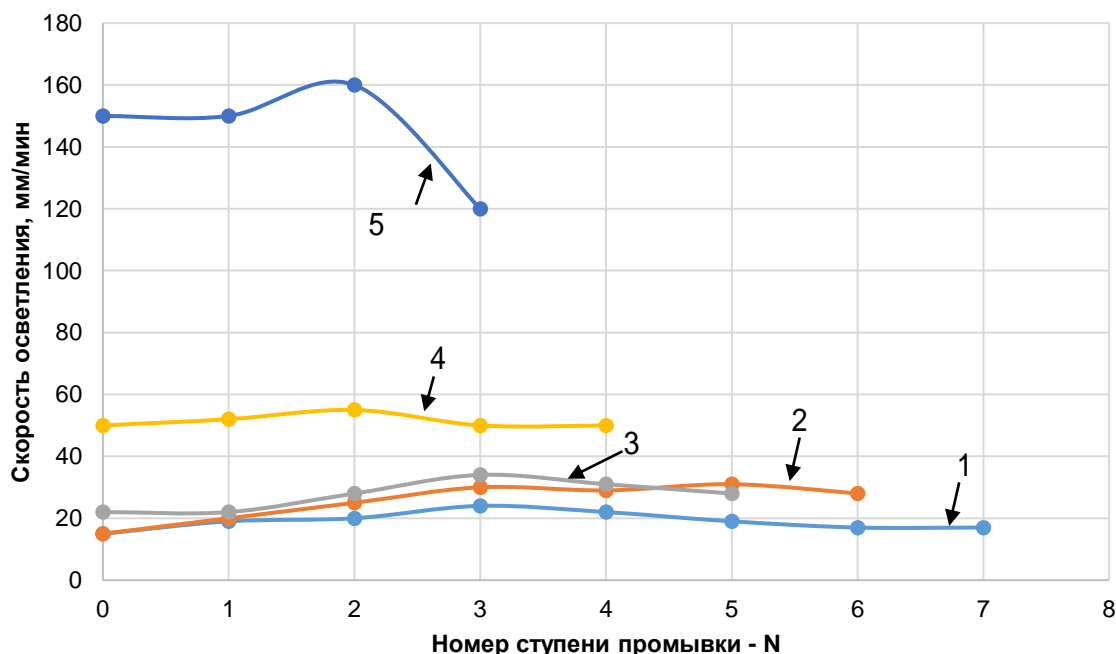


Рис. 6. Распределение скорости осветления по ступеням промывки в зависимости от кратности промывки при постоянном суммарном расходе промывочной воды: 1–7-кратная противоточная промывка ($p = 2$); 2–6-кратная противоточная промывка ($p = 2,3$); 3–5-кратная противоточная промывка ($p = 2,8$); 4–4-кратная противоточная промывка ($p = 3,7$); 5–3-кратная противоточная промывка ($p = 6$)
 Fig. 6. Clarification rate distribution by the stages of washing depending on the washing frequency at a constant total consumption of wash water: 1–7-times counter-current washing ($p = 2$); 2–6- times counter-current washing ($p = 2.3$); 3–5-times countercurrent washing ($p = 2.8$); 4–4-times countercurrent washing ($p = 3.7$); 5–3-times countercurrent washing ($p = 6$)

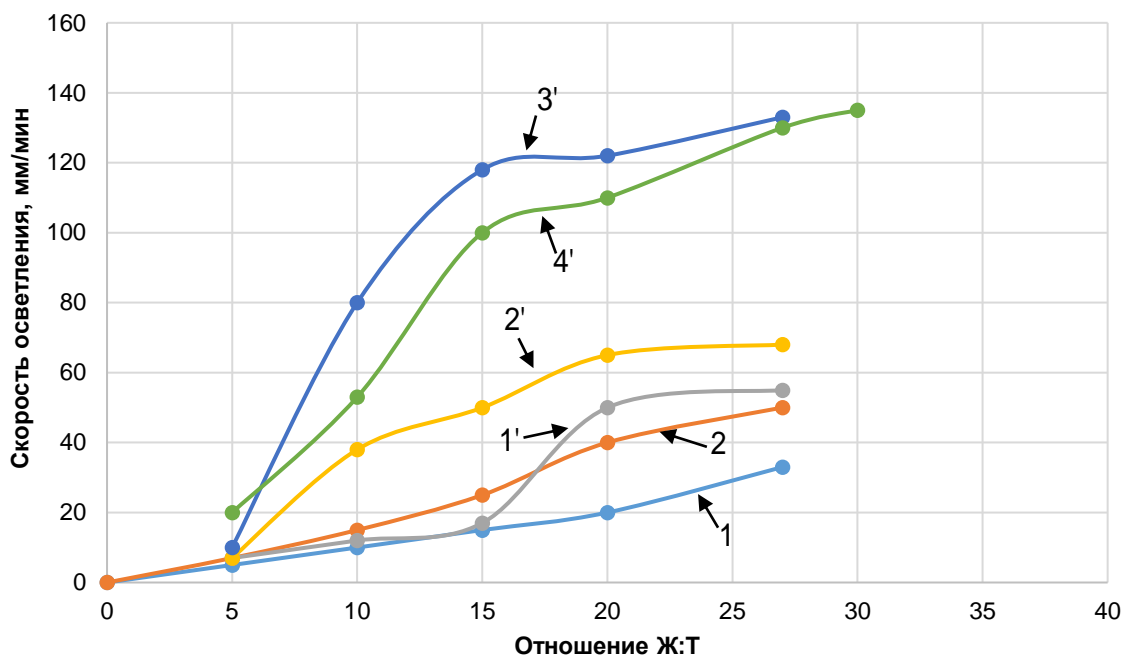


Рис. 7. Влияние разбавления пульпы на скорость осветления: 1, 2 – без ввода флокулянта; 1' – 160 г/дм³ Na₂O_к; 2' – 3 г/дм³ Na₂O_к; 3' – 10 г/дм³ Na₂O_к; 4' – ввод флокулянта (муки); 1' – 160 г/дм³ Na₂O_к; 2' – 80 г/дм³ Na₂O_к; 3' – 10 г/дм³ Na₂O_к; 4' – 3 г/дм³ Na₂O_к

Fig. 7. Effect of pulp dilution on clarification rate: 1, 2 – without flocculant introduction; 1' – 160 g/dm³ of Na₂O_к; 2' – 3 g/dm³ of Na₂O_к; 3' – 10 g/dm³ of Na₂O_к; 4' – introduction of flocculant (flour); 1' – 160 g/dm³ of Na₂O_к; 2' – 80 g/dm³ of Na₂O_к; 3' – 10 g/dm³ of Na₂O_к; 4' – 3 g/dm³ of Na₂O_к

мов АО «Алюминий Казахстана» с обработкой их мукой в оптимальной дозировке при разном Ж:Т. Разбавление пульпы усиливает эффект от применения флокулянта, однако во всех случаях максимальная скорость осветления отвечает изоэлектрическому состоянию (20 г/дм³ Na₂O).

Аналогичная картина наблюдается при изменении степени разбавления и концентрации щелочи в жидкой фазе пульпы на нарушение агрегативной и кинетической устойчивости пульп красных шламов ООО «БАЗ» в ходе противоточной промывки (рис. 6). Графики характеризуют скорость осветления на ступенях промывки при постоянном суммарном расходе промывной воды

(р). Величина p равна отношению количество слива в сгустители к количеству раствора в сгущенной пульпе. Кратность промывки – это количество ступеней схемы противоточной промывки при определенном значении p . Существенное влияние на производительность отстойников оказывает отношение Ж:Т. На рис. 7 представлены кривые, характеризующие влияние разбавления на скорость осветления пульп красных шламов, как при обработке их мукой, так и без обработки. Рост Ж:Т сопровождается увеличением скорости осветления $W_{осв.}$, особенно в области малых концентраций. В состоянии близком к изоэлектрическому (10 г/дм³ Na₂O_к) наблюдается максимальная скорость осветления.

Заключение

Таким образом, по результатам исследований процессов обезвоживания и промывки красных шламов, полученных из низкремнистых бокситов при производ-

стве глинозема с применением флокулянтов, можно сделать следующие выводы:

1. Применение флокулянтов в процессах обезвоживания и промывки красных

шамов при росте скорости осветления оказывает влияние на кинетику процесса сгущения суспензий красного шлама (формирование зон и протяженность зоны сгущения).

2. Применение флокулянтов не влияет на физико-химические свойства суспензии. Изoeлектрическое состояние наблюда-

ется как для необработанных, так и для обработанных суспензий при одинаковом значении концентрации растворенного вещества.

3. С увеличением разбавления суспензии изменение скорости осветления для пульп, обработанных реагентом (или реагентами) имеет более сложную зависимость, чем для необработанных (линейная).

Библиографический список

1. Сибирзянов Н.А., Яценко С.П. Гидрохимические способы комплексной переработки боксита. Екатеринбург: Уро РАН. 2006. 386 с.
2. Шморгуненко Н.С., Корнеев В.Н. Комплексная переработка и использование отвальных шламов глиноземного производства. М.: Металлургия, 1982. 128 с.
3. Трушко В.Л., Утков В.А., Бажин В.Ю. Актуальность и возможность полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки горного института, 2017. Т. 227. С. 547–553.
4. Подгородецкий Г.С., Ширяева Е.В., Горбунов В.Б., Козлова О.Н. Проблема эффективной переработки красных шламов, поиск решений // Экология и промышленность. 2015. Т. 19. № 12. С. 46–53.
5. Пягай И.Н. Блочная переработка бокситовых шламов глиноземного производства // Цветные металлы. 2016. № 7. С. 43–51.
6. Лихолобов Е.Ю., Быков П.О. Переработка шламов глиноземного производства АО «АК» // Наука и техника Казахстана. 2010. № 2. С. 38–42.
7. Добра Д., Кисилев А., Лайнер Е., Алистарх В., Ангеловичи Н., Ильев С. Переработка бокситов Сьера-Леоне на заводе Алюм. г. Тулга // «Цветные металлы» – 2011: III Междунар. конгресс (г. Красноярск, 2011 г.). Красноярск, 2011. С. 111–115.
8. Пат. № 3268563, Российская Федерация. Способ сгущения пульп глиноземного производства / С.Р. Рафиков, Г.А. Толстиков, Г.В. Леплянин, Л.Ф. Антонова, Л.Н. Сулоева, А.А. Андрусенко, Ф.П. Парамонов, С.Г. Истлеев, В.Н. Коротич, В.А. Андресон;

опубл. 23.09.83. Бюл. 35 (72).

9. Патент № 2024550, Российская Федерация. Полиакриловая кислота в качестве высокомолекулярного коагулянта флокулянта-осадителя шлама в глиноземном производстве и способ ее получения / В.А. Молотков, Г.В. Шишкина, В.Н. Курлянкина, Е.Н. Хлебосолова, С.И. Кленин, С.Я. Любина, А.И. Киппер, И.П. Краус, О.А. Репницкая; опубл. 15.12.1994. Бюл. 33.
10. Pulford I.D., Hargreaves J.S.J., Durisova J., Kramulova B., Carbonized red mud – A new water treatment product made from a waste material // Journal of Environmental Environmental & Management. 2012. Vol. 100. № 6. P. 59–64.
11. Branning M.L., Richardson P.F. Factors affecting the dewatering of coal refuse slurries using twin belt continuous filters // Paper presented at Coal Prep 86, hexington, Kentucky. April 28–30, 1986.
12. Connelly L.J., Owen D.O., Richardson P.E. Synthetic Flocculant Technology in the Bayer Process // Light Metals. 1986. Vol. 2. P. 61–68.
13. Zatulovskiy K.A., Modeling of Charifer–Thickeuer at // Internat at omal Conference «62 Ber – und Steady – State Httenmanncher Ta. Innovat on Greo cence, GeoenneernaudMetallury», Vol. 1, Free: TV Bergakademie, Germany. 2011. P. 156–162.
14. Зиман А.Д. Физическая химия. М.: Красанд, 2015. 318 с.
15. Хмельницкий Р.А. Физическая и коллоидная химия. М.: АльЯнс, 2015. 400 с.

References

1. Sibirzyanov N.A., Yacenko S.P. *Gidrohimicheskie sposoby kompleksnoj pererabotki boksita* [Hydrochemical methods of complex processing of bauxite]. Ekaterinburg: Uro RAN Publ., 2006, 386 p. (In Russ.).
2. Shmorgunenko N.S., Korneev V.N. *Kompleksnaya pererabotka i ispol'zovanie otval'nyh shlamov glinozemnogo proizvodstva* [Complex processing and use of waste sludge of alumina production]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1982, 128 p. (In Russ.).
3. Trushko V.L., Utkov V.A., Bazhin V.Yu. Relevance and possibility of complete processing of red slurries of alumina production. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2017, vol. 227, pp. 547–553. (In Russ.).

4. Podgorodeckij G.S., Shiryayeva E.V., Gorbunov V.B., Kozlova O.N. The problem of efficient processing of red mud: search for solutions. *Ekologiya i promyshlennost Rissii* [Ecology and Industry of Russia], 2015, vol. 19, no. 12, pp. 46–53. (In Russ.).
5. Pyagay I.N. Block processing of bauxite slurries of alumina production. *Cvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2016, no. 7, pp. 43–51. (In Russ.).
6. Liholobov E.Yu., Bykov P.O. Processing of slurries of alumina production of “AK” JSC *Nauka i tekhnika Kazahstana*, 2010, no. 2, pp. 38–42. (In Russ.).
7. Dobra D., Kisilev A., Lajner E., Alistarh V., Angelovichi N., Il'ev S. *Pererabotka boksitov S"era-Leone na zavode*



Alum. g. Tulga [Bauxite processing in Sierra Leone at the plant Alum in the town of Tulga]. *III Mezhdunarodnyy kongress "Cvetnye metally" – 2011* [III International Congress "Non-Ferrous Metals"-2011, Krasnoyarsk, 2011]. Krasnoyarsk, 2011, pp. 111–115. (In Russ.).

8. Rafikov S.R., Tolstikov G.A., Lepyanin G.V., Antonova L.F., Suloeva L.N., Andrusenko A.A., Paramonov F.P., Istleev S.G., Korotich V.N., Andreson V.A. *Sposob sgushcheniya pul'p glinozemnogo proizvodstva* [A method of thickening alumina production slurry]. Patent RF, no. 3268563, 1983.

9. Молотков В.А., Шишкина Г.В., Курлянкина В.Н., Хлебосолова Е.Н., Кленин С.И., Любина С.Я., Киппер А.И., Краус И.П., Репницкая О.А. Molotkov V.A., Shishkina G.V., Kuryankina V.N., Khlebosolova E.N., Klenin S.I., Lyubina S.Ya., Kipper A.I., Kraus I.P., Repnitskaya O.A. *Poliakrilovaya kislota v kachestve vysokomolekulyarnogo koagulyanta flokulyanta-osaditelya shlama v glinozemnom proizvodstve i sposob ee polucheniya* [Polyacrylic acid as a high molecular weight coagulant of sludge flocculant precipitator in alumina production and its preparation method]. Patent RF, no. 2024550, 1994.

Критерии авторства

Саламатов О.В., Саламатов В.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Саламатов Олег Викторович,
директор,
Восточно-Сибирский АО «Север Минералс»,
664050, г. Иркутск, ул. Байкальская, 280/1, Россия;
e-mail: auto@istu.edu

Саламатов Виктор Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: Salamatov_52@mail.ru

10. Pulford I.D., Hargreaves J.S.J., Durisova J., Kramulova B., Carbonized red mud – A new water treatment product made from a waste material. *Journal of Environmental Environmental & Management*. 2012, vol. 100, no. 6, pp. 59–64.

11. Branning M.L., Richardson P.F. Factors affecting the dewatering of coal refuse slurries using twin belt continuous filters. Paper presented at Coal Prep 86, hexington, Kentucky. April 28–30, 1986.

12. Connelly L.J., Owen D.O. Richardson P.E. *Synthetic Flocculant Technology in the Bayer Process*. Light Metals, 1986. vol. 2, pp. 61–68.

13. Zatulovskiy K.A., Modeling of Charifer–Thickeuer at International Conference «62 Ber – und Steady – State Httenmanncher Ta. Innovat on Greo cence, Geoenneer-naudMetallury», Vol. 1, Free: TV Bergakademie, Germany, 2011, pp. 156–162.

14. Ziman A.D. *Fizicheskaya himiya* [Physical Chemistry]. Moscow: Krasand Publ., 2015, 318 p. (In Russ.).

15. Hmel'nickij R.A. *Fizicheskaya i kolloidnaya himiya* [Physical and Colloidal Chemistry]. Moscow: Al'Yans Publ., 2015, 400 p. (In Russ.).

Authorship criteria

Salamatov O.V., Salamatov, V.I. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Salamatov Oleg Viktorovich,
Director of the East-Siberian Branch
of Sever Minerals JSC,
280/1 Baikalskaya St., Irkutsk 664050, Russia;
e-mail: auto@istu.edu

Viktor I. Salamatov
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Machine
Building Technologies and Materials of Irkutsk National
Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: Salamatov_52@mail.ru



Перспективы использования глин локального проявления в металлургической практике

© А.А. Яковлева, Н.В. Немчинова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель работы – оценить перспективы использования глины Молоковского месторождения (Забайкалье) в металлургической практике. Определена механическая прочность склеивания шамотных брусков пастами из глины и шамотной крошки. Полученные результаты свидетельствуют об аналогии адгезионных взаимодействий, которые обеспечены близостью кристаллохимического состава. Несмотря на то, что в составе глины Молоковского месторождения кроме оксидов алюминия и кремния находится до 20% оксидов других элементов, участие их в процессах конструирования структуры прослойки не приводит к заметному понижению прочностных характеристик. При изучении свойств паст из глины и шамотной крошки использованы традиционные физико-химические и теплотехнические методы исследования: гравиметрия, химический анализ ориентированного образца минерального сырья. Для определения механической прочности применена экстензометрия на испытательной машине «Shimadzu Autograph AGS-X». Установлен химический и минеральный состав глины Молоковского месторождения и показано, что около 80% состава – это оксиды алюминия (18%) и кремния (61%), присутствуют также оксиды натрия и калия, кальция, титана, железа, магния и марганца. Минеральные проявления обнаруживаются в виде кальцита, щелочных полевых шпатов, мусковита, смектита и слюды-смектита. На основе проведенных лабораторных исследований установлено, что использование глины Молоковского месторождения (Забайкалье) возможно в металлургической практике и может быть рекомендовано для футеровочных масс, обмазки и скрепления огнеупорных кладок, обработки вспомогательных инструментов – изложниц, пробоотборников, черпаков для расплава.

Ключевые слова: металлургические печи, глина, глинистые минералы, суспензия, паста, сжатие

Информация о статье: Дата поступления 15 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 18 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2019 г.

Для цитирования: Яковлева А.А., Немчинова Н.В. Перспективы использования глин локального проявления в металлургической практике. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т.23. №2. С. 415–425. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-415-425.

Local clay prospects to be used in metallurgical practice

Ariadna A. Yakovleva, Nina V. Nemchinova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of the paper is to assess the prospects for using the Molokovskoye deposit (Transbaikalia) clay in metallurgical practice. The mechanical strength of bonding chamotte blocks with clay and chamotte crumb pastes is determined. The results obtained indicate the analogy of adhesive interactions ensured by the proximity of the crystal chemical composition. Despite the fact that, in addition to aluminum and silicon oxides, the Molokovskoye deposit clay contains up to 20% of oxides of other elements, their participation in building the interlayer structure does not lead to a noticeable decrease in strength characteristics. The properties of pastes made of clay and chamotte crumbs are studied using traditional physicochemical and thermal engineering research methods including gravimetry, chemical analysis of an oriented sample of mineral raw materials. Extensomentering on the Shimadzu Autograph AGS-X testing machine is used to determine the mechanical strength. The chemical and mineral composition of the Molokovskoye deposit clay is determined. It is shown that about 80% of the total composition is formed by aluminum oxide (18%) and silicon oxide (61%). The clay also features the presence of oxides of sodium and potassium, calcium, titanium, iron, magnesium and manganese. Mineral manifestations are found in the form of calcite, alkaline feldspar, muscovite, smectite and mica-smectite. The conducted laboratory studies classified the clay from the Molokovskoye deposit (Transbaikalia) able to be used in metallurgical practice and useful to be recommended for lining masses, coating and fixing of blast-furnace masonry, processing of auxiliary tools such as molds, samplers and spoons for melt.

Keywords: metallurgical furnaces, clay, clay minerals, suspension, paste, compression

Information about the article: Received February 15, 2019; accepted for publication March 18, 2019; available online April 30, 2019.

For citation: Yakovleva A.A., Nemchinova N.V. Local clay prospects to be used in metallurgical practice. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019, vol. 23, pp. 415–425. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-415-425.

Введение

Глины являются одним из наиболее распространенных типов горных пород, которые широко используются в производстве строительных материалов, в качестве наполнителя при изготовлении резины, бумаги, буровых растворов, в качестве сорбентов и т.д.¹ [1–5]. В металлургической практике использование глин также очень разнообразно, например, глина является составной частью при производстве огнеупоров различного назначения^{2,3}. Благодаря успехам развития научных основ в области физической химии силикатов эффективность использования глины постоянно повышается [6–7]. При физико-химических исследованиях чаще акцентируют внимание на такие важные вопросы для технологии силикатов как: зависимость полноты протекания поверхностных взаимодействий, обеспечивающих качество огнеупорного изделия; особенности структуры кристаллической решетки, размеры, форма и рельеф поверхности дисперсных частиц. Без знаний этих вопросов практически невозможно понять, а тем более целенаправленно управлять различными свойствами огнеупоров [8].

Вместе с тем в настоящее время явно недостаточно развиты и изучены вопросы, посвященные физико-химическим особенностям силикатных систем в состоянии суспензий, когда твердая фаза находится в высокодисперсном состоянии и имеет развитую границу раздела фаз. Про-

цессы на поверхности дисперсных частиц – это предыстория, которая определяет конечные свойства продуктов и изделий. Вопросы, посвященные закономерностям взаимодействия глинистых частиц, влиянию различных факторов (температура, pH, присутствие электролитов), расчет энергии взаимодействия и определение особенностей поверхности минеральных дисперсий являются актуальными [9–11].

Необходимо отметить, что часто информация в области физикохимии силикатов основана на исследованиях общетеоретического характера. Вместе с тем глины разных месторождений имеют свои особенности по строению и структуре кристаллической решетки, ее дефектам, замещениям ионов и т.п. Изучению конкретных месторождений уделяется в последнее время много внимания, однако при этом малоизученными остаются глины Сибири. Вместе с тем изучение местных возможностей и использование глин локального проявления может способствовать снижению стоимости продукции, отказу (полному или частичному) от необходимости ввоза глинистого сырья, а при условии получения огнеупорных материалов с лучшими эксплуатационными характеристиками дает перспективу для развития и увеличения масштабов производства продукции [12].

В связи с этим особое значение приобретают физико-химические исследования глины небольшого рудопроявления в Забай-

¹Горшков В.С., Савельев В.С., Федоров Н.Ф. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений: учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1988. 400 с. / Gorshkov V.S., Savelyev V.S., Fedorov N.F. Physical chemistry of silicates and other refractory compounds: Learning aids. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988, 400 p.

²Диомидовский Д.А. Металлургические печи цветной металлургии: учеб. пособ. М.: Metallurgizdat, 1970. 704 с. / Diomidovskiy D.A. Metallurgical furnaces of non-ferrous metallurgy: Learning aids. Moscow: Metallurgizdat, 1970, 704 p.

³Процессы и аппараты цветной металлургии: учебник / под ред. С.С. Набойченко. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та. 2013. 562 с. / Processes and equipment of nonferrous metallurgy: Textbook under edition of S.S. Naboichenko. Ekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2013, 562 p.



калье. Такие исследования позволят обосновать возможность использования глины.

Образцы глины как объекта исследования отобраны из карьера Молоковского месторождения (юго-восток Забайкалья). Глина использовалась на ранее существовавшем предприятии «Забайкальский ГОК»,

издавна и до настоящего времени местным населением глина применяется для бытовых нужд.

Цель исследования – оценить перспективы использования глины Молоковского месторождения (Забайкалье) в металлургической практике.

Материал и методы исследования

Исходная глина представляла достаточно крупные каменистые куски буровато-коричневого цвета и пористую структуру (рис. 1).

Как оказалось, в дальнейшем после обжига глина приобретает красивый терракотовый цвет. Подготовка глины к коллоидно-химическим исследованиям заключалась в очистке образцов от механических примесей и измельчении. Рассев материала на стандартных ситах позволил получить характер распределения частиц по размерам [13].

При достижении цели исследования были рассмотрены такие свойства глины Молоковского месторождения, в которых выявляется ее подобие по отношению к свойствам известных систем^{4,5}.

Для оценивания способности глины выполнять функции связующего были подготовлены бруски из шамотного кирпича, на рис. 2 представлены пары в серии опытов,

когда глину замешивали на воде. Различия в размерах брусков связаны с требованиями при испытаниях механических свойств, например, для настройки шкалы экстензометра нужен удлиненный образец, для ударного воздействия – квадратный и т.д.

Для сравнения использовали пасту из шамотной крошки на воде. Во второй серии опытов для получения пасты использовали т.н. «жидкое стекло» – силикатный клей (водный раствор силиката натрия $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$).

Для приготовления пасты для склеивания брусков использовали глину и шамотную крошку, которую предварительно также рассеивали на ситах. Использовали порошки одной фракции (средний размер 0,175 см).

Для приготовления вязких паст засыпали глину или шамотный порошок в фарфоровые чашки, добавляли воду или жидкое стекло, все это тщательно размешивали до однородной смеси (рис. 3).



Рис. 1. Исходная глина Молоковского месторождения
Fig. 1. Original clay of the Molokovskoye deposit

⁴Новый справочник химика и технолога: в 7 т. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия / под. ред. С.А. Симановой. Санкт-Петербург: Профессионал, 2004. 837 с. / New handbook of a chemist and technologist: in 7 volumes. Electrode processes. Chemical kinetics and diffusion. Colloid chemistry. Under edition of S.A. Simanov. St. Petersburg: Professional, 2004, 837 p.

⁵Романков П.Г., Курочкина М.И., Мозжерин Ю.Я., Смирнов Н.Н. Процессы и аппараты химической промышленности: учебник. Л.: Химия, 1989. 554 с. / Romankov P.G., Kurochkina M.I., Mozzherin Yu.Ya., Smirnov N.N. Chemical industry processes and devices: Textbook. Leningrad: Himiya Publ., 1989, 554 p.



Рис. 2. Вид шамотных брусков
Fig. 2. Types of chamotte blocks

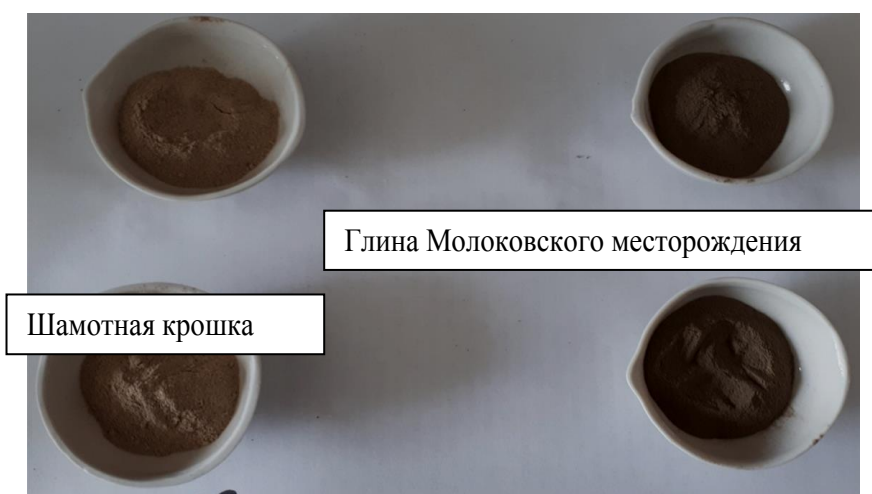


Рис. 3. Формование паст из связующего и добавки
Fig. 3. Paste molding from a binder and an additive

Полученные пасты выкладывали слоем в 1–2 мм между одинаковыми по размеру брусками для их склеивания и оставляли на сутки для высушивания под нагрузкой 50 г/см² при комнатной температуре. После высушивания образцы подвергали обжигу в муфельной печи с терморегулятором, обеспечивающей нагрев до 1000–1100°C. Погрешность измерения температуры в рабочем пространстве печи составляла ±50°C.

Определение потерь при прокаливании (ППП), согласно ГОСТ 1995-01-01 [14], основано на прокаливании образцов при температуре (1000±50)°C до постоянной массы и определении потери массы глины гравиметрическим способом. По расчетам отклонения данных параллельных опытов не превышали 1,5%. В табл. 1 приведены усредненные данные ППП.

Таблица 1

Определение потерь при прокаливании

Table 1

Loss determination at calcination

Связующее		Массы, г			ППП, %
Добавка	Основа	до	после	Δm	
вода	глина	115	94,7	20,3	17,6
	шамотная крошка	91	74,5	16,5	18,10
жидкое стекло	глина	86,6	80,6	6	6,93
	шамотная крошка	42	40	2	4,80



Для контроля качества исследуемых образцов прочность использовалась как базовое механическое свойство, испытания были выполнены на экстензомере «Shimadzu Autograph AGS-X». Проведены испытания на разрыв и на сжатие/изгиб, на рис. 4 приведен один из протоколов испытаний, на рис. 5 показаны изменения механической прочности в одном из опытов.

Полученные первичные результаты механических испытаний сведены в табл. 2 для анализа, при этом рассмотрены:

- максимальный деформационный ход s ;
- максимальное деформирующее напряжение U ;
- максимальная деформирующая сила F .

Было проведено определение кристаллохимического состава глины Молоковского месторождения. Для определения минерального состава глины, истертой в агатовой ступке со спиртом, использовали метод порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН – 3.0, фазовый состав пробы был расшифрован с помощью программы поиска фаз (Diffrac^{plus}, PDF-2, 2007 г) [15].

Для определения глинистых минералов осуществлялась подготовка ориентированного материала пробы осаждением глинистой фракции на стеклянной подложке, прогреванием при температуре 550°C (в течение 3 часов) и насыщением этиленгликолем и диметилсульфоксидом. На рис. 6 и 7 представлены результаты исследований.

Ключевое слово	Наименование продукта	
Имя файла испытания	образец2.xtas	Имя файла метода
Дата отчета	30.05.2018	Дата испытания
Режим испытания	Одиночный	Тип испытания
Скорость	1мм/мин	Форма
Серия:	1	Части серии

Имя	МАХ	ВПрТ (%FS)_Сила	Макс_Сила	Макс_Напряжение
Параметры	2 Точки	0,1%	Расчет во всех областях	Расчет во всех областях
Единица	Н/мм2	Н	Н	Н/мм2
1_1	240,200	2335,95	5740,22	8,91338

Имя	Макс_Ход	Установка1_Сила	Установка1_Напряжение	Установка1_Ход
Параметры	Расчет во всех областях	Сила 1Н	Сила 1Н	Сила 1Н
Единица	мм	Н	Н/мм2	мм
1_1	2,07973	1,00000	0,00155	0,00147

Имя	Макс_Деф_Сила	Макс_Деф_Напряжение	Макс_Деф_Ход	Высота
Параметры				
Единица	Н	Н/мм2	мм	мм
1_1	5738,90	8,91133	2,08137	20,0000

Имя	Толщина
Параметры	
Единица	мм
1_1	28,0000

Рис. 4. Протокол испытания на механическую прочность образца «шамотная крошка – жидкое стекло»

Fig. 4. Report of testing mechanical strength of the sample «chamotte crumb – liquid glass»

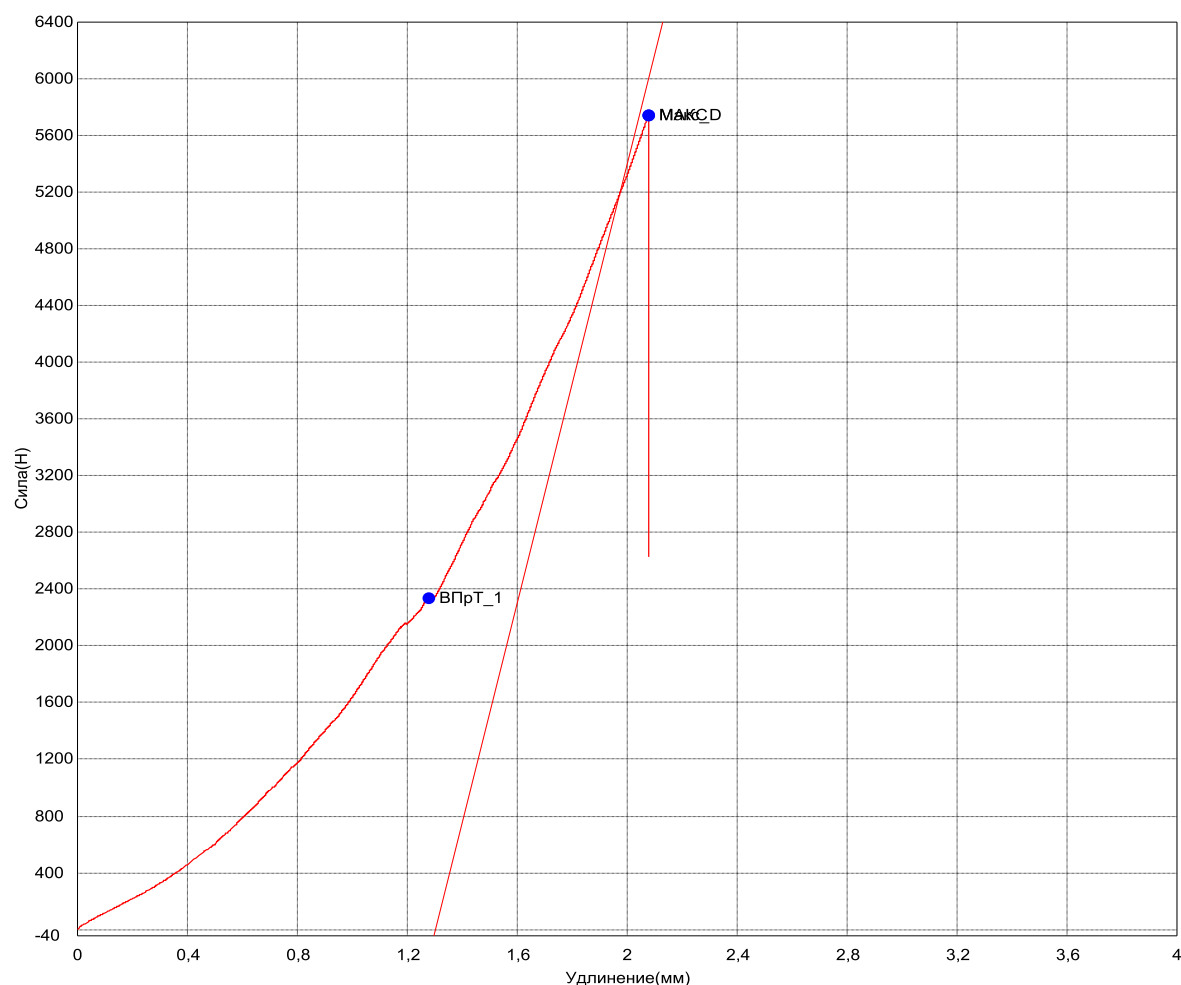


Рис. 5. Механическая прочность образца «шамотная крошка – жидкое стекло»
Fig. 5. Mechanical strength of the sample «chamotte crumb – liquid glass»

Обобщенные результаты испытаний

Таблица 2

Table 2

Generalized test results

Состав связующей пасты	s, мм	U, Н/м ²	F, Н
Глина – жидкое стекло	2,85	8,25	3011,4
Шамотная крошка – жидкое стекло	2,08	8,91	5738,9
Глина – вода	1,16	0,31	275,4
Шамотная крошка – вода	1,12	0,28	304,9

Расшифровка рентгенограммы показывает, что фазовый состав глины Молоковского месторождения представлен кварцем, полевыми шпатами, слюдой, кальцитом. Имеются следы таких глинистых минералов как смектит и смешанослойный минерал слюда-смектит. Минеральный состав вклю-

чает до десятка оксидов (табл. 3). Кроме того, химический анализ показал наличие 0,43 % CO₂; ППП составили 4,31%, в образцах находится до 0,88% гигроскопической воды.

Минеральный состав шамотной крошки принят по описанию ГОСТ 390-2018⁶.

⁶ГОСТ 390-2018 Изделия огнеупорные шамотные и полукислые общего назначения. Технические условия / GOST 390-2018 Chamotte and semi-acid refractory products of general purpose. Specifications.

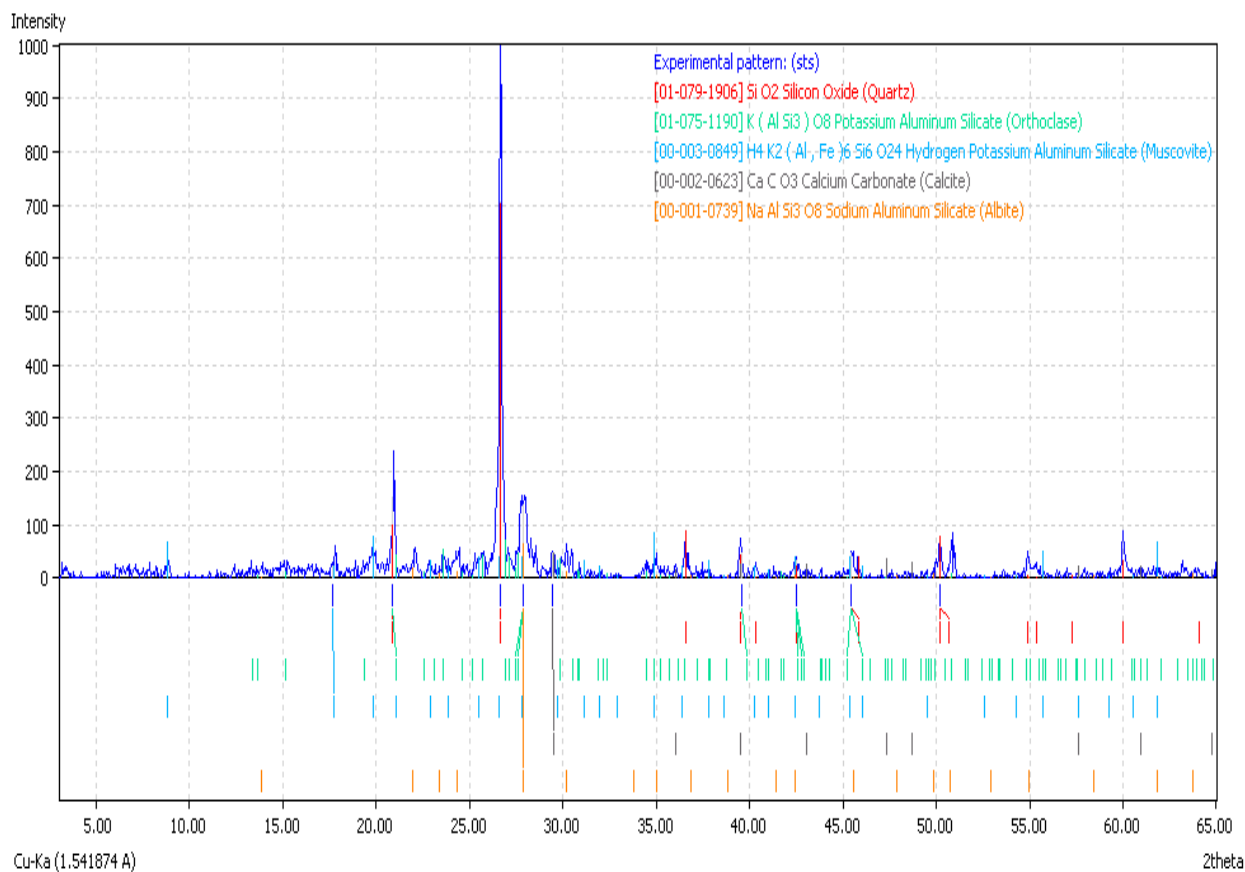


Рис. 6. Рентгенофазовый анализ глины Молоковского месторождения
Fig. 6. X-ray phase analysis of the clay from the Molokovskoye deposit

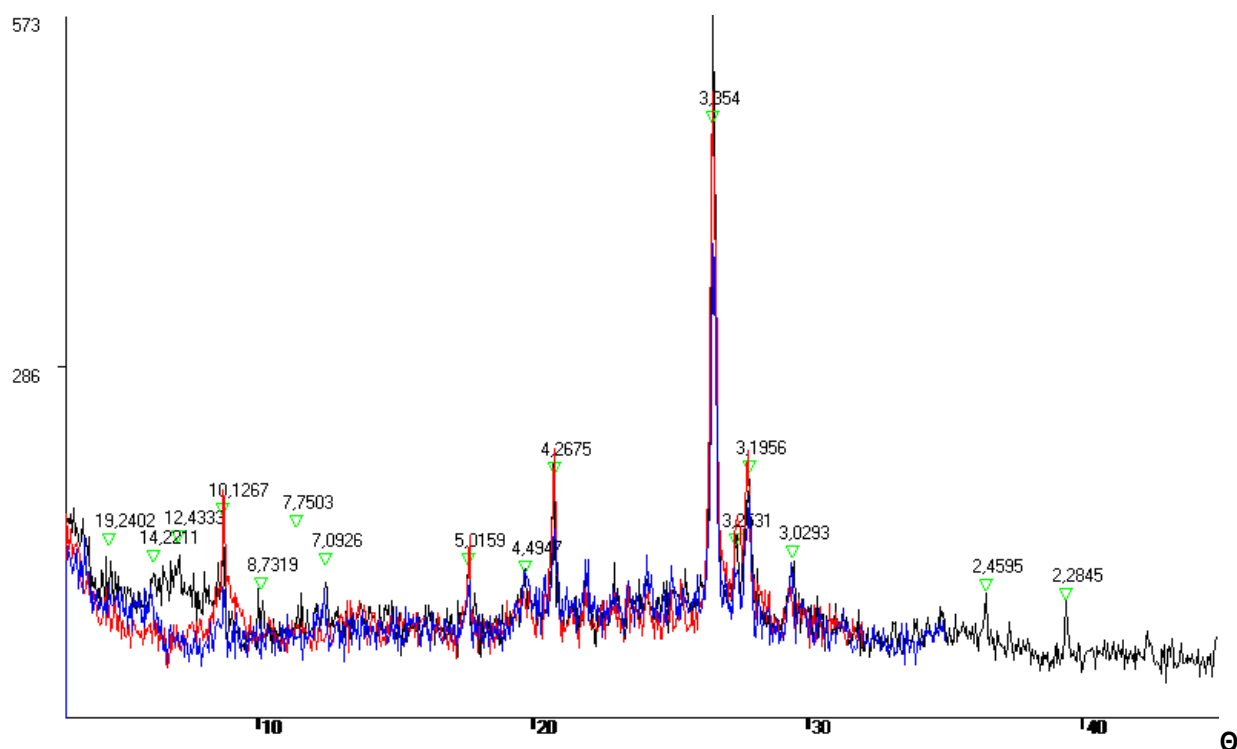


Рис. 7. Рентгенограмма от ориентированного образца
Fig. 7. XRD pattern of the oriented sample

Таблица 3

Содержание оксидов в глине Молоковского месторождения

Table 3

Oxide percentage in the Molokovskoye deposit clay

Оксид	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (общ.),	CaO	K ₂ O
Содержание, %	61,14	18,15	5,39	3,46	2,73
Оксид	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Содержание, %	1,90	1,49	0,834	0,131	0,110

Результаты исследования и их обсуждение

Из табл. 1 видно, что использование воды для приготовления пасты дает одинаковое значение ППП для исследуемой глины и шамотного порошка, в среднем оно составляет 18%, в случае с жидким стеклом, значения потерь при прокаливании ниже. В близости сравниваемых величин начинается проявление некоторой схожести свойств порошкообразных материалов – шамота и глины Молоковского месторождения.

Оксиды глины Молоковского месторождения входят в состав типичных породообразующих минералов – альбит, натриевый и калиевый полевые шпаты, мусковит и кальцит.

Как известно, шамот изготавливают из мономинерала каолинита $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_2$ или $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, месторождения которого встречаются нечасто, вот тут-то и возникает вопрос: не может ли местная глина стать альтернативным минерально-сырьевым ресурсом.

В соответствии со стехиометрией каолинит содержит 39,5% Al_2O_3 , 46,5% SiO_2 и 14% воды, которая удаляется в процессе получения шамота (каолина), и является продуктом разложения полевых шпатов. Присутствие в земной коре любых глинистых минералов, особенностью которых является слоистая кристаллическая решетка, влияющая на пластичность и некоторые другие свойства, по мнению некоторых минералогов, является примером незавершенного, длительно протекающего процесса образования каолинита [16]. Насколько при-

ближены в данной местности минеральные проявления к составу каолинита, т.е. насколько полно прошло разложение сложных минеральных образований, настолько высока вероятность обнаружить в местных глинах свойства, присущие каолиниту, – сырью для производства огнеупоров. Однако всегда при этом остается еще одна важная составляющая – примеси, способные придать местным глинам уникальные свойства.

Согласно ГОСТ 390-2018, из физико-химических показателей обычно указывают содержание основных компонентов: в разных марках шамотных изделий содержание оксида алюминия должно быть не менее 30%, содержание оксида кремния 65–85% (табл. 4).

При визуальных наблюдениях изменения размеров прослоек не фиксируются, происходят внешние изменения (цвет). Образцы обладают умеренной механической прочностью, которая существенно зависит от природы жидкой среды, используемой для приготовления паст [17, 18].

Влияние воды, очевидно, проявляется во взаимодействии ее с некоторыми оксидами, когда происходит адсорбционное набухание, вследствие чего возникают коагуляционные решетки, в которых силы взаимодействия весьма существенны. Подобные эффекты характерны для силикатных систем, обогащенных оксидами кальция, калия, натрия, и существенно влияют на реологические свойства композиций на начальных стадиях формирования и изготовления огнеупорных изделий³.



Таблица 4

Сравнение некоторых характеристик используемых порошков

Table 4

Comparison of some characteristics of used powders

Связующее	Основные оксиды, % масс.		Плотность, кг/м ³
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	
Шамот	65–85	не менее 30	1,8–2,2
Глина	61,14	18,15	1,72

Вода при высушивании и последующем прокаливании удаляется из образцов, но способна влиять на пористость, а значит и прочность склеивающей прослойки. Таким образом, сравнения оказываются не в пользу воды, однако значимость закономерности относительна, потому что в производстве огнеупорных изделий используются и вода, и другие жидкие среды.

В нашем случае шамот выступает как эталонный образец, относительно которого оцениваются показатели глины Молоковского месторождения. Как видно из табл. 4,

в шамотном порошке содержание основных оксидов выше и является преобладающим, тогда как в исследуемой глине этих оксидов суммарно всего лишь 80%, остальное (а это пятая часть массы) составляют примесные элементы. На наш взгляд, именно такое соотношение объясняет обнаруженные различия механической прочности, придает минеральной системе пластичность и снижает ее механическую прочность. Повышенное содержание оксида алюминия в шамотной крошке также способствует высокой механической прочности этих образцов.

Заключение

В ходе исследований были изучены свойства глины локального проявления (Молоковское месторождение, Забайкалье) для оценки ее пригодности в металлургической практике. Сравнения качества глины проведены относительно качеств шамотной крошки в сходных условиях. Приготовленные на основе воды и раствора силиката натрия пасты использовали для склеивания брусков из шамотного кирпича. После просушивания и прокаливания оценены потери при прокаливании, которые оказались близкими в сериях с одинаковым связующим. Показано, что исследуемые образцы дают неплохие результаты по механическим характеристикам, прочность склеивания шамотных брусков свидетельствует о схожести механизмов адгезионных взаимодействий,

которые обеспечены близостью кристаллохимического состава. Несмотря на то, что в составе глины Молоковского месторождения кроме оксидов алюминия и кремния находится до 20% оксидов других элементов, участие их в процессах конструирования структуры прослойки не приводит к заметному понижению прочностных характеристик. На основе проведенных лабораторных исследований установлено, что использование глины Молоковского месторождения (Забайкалье) вполне приемлемо в металлургической практике и может быть рекомендовано в некоторых технологических операциях, например, для приготовления футеровочных паст, для обмазки и скрепления огнеупорных кладок, для обработки вспомогательных инструментов – изложниц, пробоотборников, черпаков для расплава.

Библиографический список

1. Обзор рынка глин для производства керамики в СНГ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.informine.ru> (дата обращения: 19.10.2011).

2. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Изд-во Летопись, 2005. 664 с.

3. Кашкаев И.С. Производство глиняного кирпича. М.: Высш. шк., 1983. 223 с.

4. Кулешева И.Д. Состояние и перспективы российского рынка минеральных наполнителей для лакокрасочных материалов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2008. № 7. С. 10–13.
5. Челишев Н.Ф. Методы получения новых материалов из минерального сырья. М.: ИМГРЭ, 1990. 89 с.
6. Русанов А.И. Термодинамические основы механохимии. СПб: Наука, 2006. 221 с.
7. Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н. Пути использования местных минеральных ресурсов в агломерационном производстве АО «Уральская сталь» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2017. Т.15. № 1. С. 20–26.
8. Тарасевич Ю.И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов. Киев: Наукова думка, 1988. 248 с.
9. Яковлева А.А., Рыбина М.Н. Роль коллоидно-химических исследований глин, используемых в производстве огнеупоров // Металлургия: технологии, инновации, качество: «Металлургия – 2015»: труды XIX Международной научно-практич. конф. (г. Новокузнецк, 15-16 декабря 2015 г.). Новокузнецк, 2015. Ч.1. С. 274–280.
10. Abrougui M.M., Bonhome-Espinosa A.B., Bahri D. Rheological Properties of Clay Suspensions Treated by Hydrocyclone Process // Journal of nanofluids. 2018. No. 4. Vol. 7. P. 256-268.
11. Kameda J., Morisaki T. Sensitivity of Clay Suspension Rheological Properties to pH, Temperature, Salinity, and Smectite-Quartz Ratio // Geophysical research letters. 2017. No. 10. Vol. 44. P. 9615–9621.

12. Яковлева А.А., Мальцева Г.Д. Кристаллохимические аспекты оценки энергии взаимодействия частиц глинистых минералов // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1 (62). С. 99–114.
13. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов: 3-е изд. Л.: Химия, 1987. 264 с.
14. ГОСТ 1995-01-01. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gostrf.com/normadata/1/4294852/4294852415.htm> (дата обращения: 19.10.2011).
15. Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск: ВО Наука. Сиб. издательская фирма, 1994. 264 с.
16. Ященко Т.Г., Ухова Н.Н. Химический состав дисперсных грунтов: возможности и прогнозы (юг Восточной Сибири). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. 131 с.
17. Исагулов А.З., Ибатов М.К., Куликов В.Ю., Квон С.С., Аринова С.К. Влияние пористости шамотных кирпичей на их механические и эксплуатационные свойства // Металлургия машиностроения. 2018. № 3. С. 13–15.
18. Лесив Е.М., Безруких А.И., Беляев С.В., Юрьев П.О., Рассказова Е.В. Изменение прочности песчано-глинистых смесей от концентрации водно-глинистой суспензии и количества мусковита в ее составе // Литейное производство. 2016. № 6. С. 8–12.

References

1. *Obzor rynka glin dlya proizvodstva keramiki v SNG* [Overview of the market of clays for ceramics production in CIS]. URL: <http://www.informine.ru> (available at: 19 October 2011).
2. Ryazanov Ya.A. *Enciklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of Drilling Muds]. Orenburg: Letopis' Publ., 2005, 664 p. (In Russ.).
3. Kashkaev I.S. *Proizvodstvo glinyanogo kirpicha* [Production of clay bricks]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1983, 223 p.
4. Kuleshova I.D. Condition and prospects of Russian market of mineral fillers for coatings. *Lakokrasochnye materialy i ih primeneniye*, 2008, no. 7, pp. 10–13. (In Russ.).
5. Chelishchev N.F. *Metody polucheniya novykh materialov iz mineral'nogo syr'ya* [Methods of new materials production from mineral raw materials]. Moscow: IMGRE Publ., 1990, 89 p. (In Russ.).
6. Rusanov A.I. *Termodinamicheskie osnovy mekhanokhimii* [Thermodynamic principles of mechanochemistry]. Saint-Petersburg: Nauka Publ., 2006, 221 p. (In Russ.).
7. Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. *Puti ispol'zovaniya mestnykh mineral'nykh resursov v aglomeracionnom proizvodstve AO «Ural'skaya stal'»* [Use of local mineral resources at the

- sintering plant of the "Ural steel" Joint Stock Company]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 20–26. (In Russ.).
8. Tarasevich Yu.I. *Stroenie i himiya poverhnosti sloistyykh silikatov* [Structure and surface chemistry of layered silicates]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1988, 248 p.
9. Yakovleva A.A., Rybina M.N. *Rol' kolloidno-himicheskikh issledovaniy glin, ispol'zuemykh v proizvodstve ogneuporov* [The role of colloid-chemical investigations of clays used in the production of refractories]. *Trudy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii "Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo. Metallurgiya – 2015"* [Proceedings of XIX International Scientific and Practical conference "Metallurgy: Technology, Innovation, Quality: 'Metallurgy – 2015' ", Novokuzneck, 15–16 December 2015]. Novokuzneck, 2015, ch. 1, pp. 274–280. (In Russ.).
10. Abrougui M.M., Bonhome-Espinosa A.B., Bahri D. Rheological Properties of Clay Suspensions Treated by Hydrocyclone Process. *Journal of Nanofluids*, 2018, no. 4, vol. 7, pp. 256–268.
11. Kameda J., Morisaki T. Sensitivity of Clay Suspension Rheological Properties to pH, Temperature, Salinity,



and Smectite-Quartz Ratio. Geophysical research letters, 2017, no. 10, vol. 44, pp. 9615–9621.

12. Yakovleva A.A., Mal'ceva G.D. Crystallochemical aspects in the evaluation of clay mineral particle interaction energy. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2018, vol. 41, no. 1 (62), pp. 99–114.

13. Kouzov P.A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennyykh pylej i iz-mel'chennykh materialov* [Fundamentals for the disperse composition analysis of industrial dusts and crushed materials]. Leningrad: Himiya Publ., 1987, 264 p. (In Russ.).

14. GOST 1995-01-01. *Mezhhgosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii* [Interstate Council for standardization, Metrology and certification]. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294852/4294852415.ht> (available at: 19 October 2011).

Критерии авторства

Яковлева А.А. и Немчинова Н.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковлева Ариадна Алексеевна,
доктор технических наук, профессор кафедры химии и пищевой технологии им. проф. Тутуриной В.В.,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Россия;
e-mail: ayakovistu@mail.ru

Немчинова Нина Владимировна,
профессор, доктор технических наук,
заведующая кафедрой металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Россия;
e-mail: ninavn@yandex.ru

15. Revenko A.G. *Rentgenospektral'nyj fluorescentnyj analiz prirodnih materialov* [X-ray fluorescence analysis of natural materials]. Novosibirsk: VO Nauka. Siberian Publishing Company, 1994, 264 p. (In Russ.).

16. Ryashchenko T.G., Uhova N.N. *Himicheskij sostav dispersnykh gruntov: vozmozhnosti i prognozy (yug Vostochnoj Sibiri)* [Chemical composition of dispersed soils: possibilities and forecasts (south of Eastern Siberia)]. Irkutsk: IZK SO RAN, 2008, 131 p. (In Russ.).

17. Isagulov A.Z., Ibatov M.K., Kulikov V.Yu., Kvon S.S., Arinova S.K.

Influence of fireclay bricks porosity on their mechanical and operational properties. *Metallurgiya mashinostroeniya* [Metallurgy of Machinery Building], 2018, no. 3, pp. 13–15. (In Russ.).

18. Lesiv E.M., Bezrukih A.I., Belyaev S.V., Yur'ev P.O., Rasskazova E.V. Investigation of the strength characteristics from the concentration water-clay suspension and amount of muscovite in sand-clay mixtures. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment]. 2016, no. 6, pp. 8–12. (In Russ.).

Authorship criteria

Yakovleva A.A. and Nemchinova N.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ariadna A. Yakovleva,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Chemistry and Food Technology named after the Professor V.V. Tuturina of Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia;
e-mail: ayakovistu@mail.ru

Nina V. Nemchinova, Professor, Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy of Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia;
e-mail: ninavn@yandex.ru

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставляется одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pqp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с **приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах)**;
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pqp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 2 (145) 2019

12+

Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.02.2019 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 29,5.
Тираж 500 экз. Заказ 126. Поз. плана 3н.

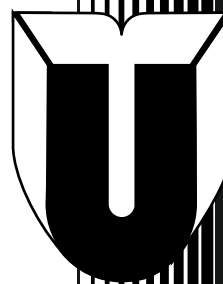
Издание распространяется **бесплатно**

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

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019

