

Том 23 № 1
2019

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

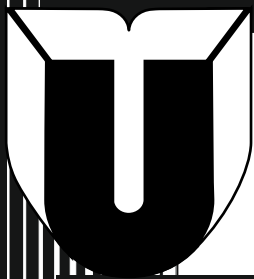
ВЕСТНИК

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 № 1

2019

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 23 № 1

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, редакции:
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
e-mail: ppg@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. 1
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 and editorial office:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074
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



Машиностроение и машиноведение

❏ Вулых Н.В., Гайсин С.Н. Сравнение эффективности использования многодисковых шлифовальных головок при формировании уплотнительной поверхности затворного узла трубопроводной арматуры.....	8
❏ Вьюнг Куанг Чык, Ковригина И.В., Елисеев С.В., Кибирев Ю.В. Технологические вибрационные машины – новые подходы в оценке и корректировке динамических состояний. Часть I.	16
❏ Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь, Фам Ван Ань. Сравнение качества поверхностного слоя и эксплуатационных характеристик деталей, упрочненных разными способами поверхностного пластического деформирования.....	28
❏ Звездин А.В., Нижегородов А.И. Оценка энергоэффективности подвесной нагревательной системы электрической печи для тепловой обработки сыпучих материалов.....	41
❏ Костин П.Н., Лукьянов А.В. Коррекция частоты вращения шпинделя при фрезеровании по данным численного моделирования системы: приспособление-инструмент-заготовка.....	54



Энергетика

❏ Алферов И.В., Зырянов В.М., Митрофанов Н.А. Анализ аварийности и причин выхода из строя конденсаторных установок в системе электроснабжения нефтегазодобывающего месторождения.....	63
❏ Аскаров А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В. Применение всережимного моделирующего комплекса для энергосистем с распределенной генерацией.....	75
❏ Большанин Г.А. Методика определения электрических параметров с учетом волновой теории передачи электрической энергии.....	90
❏ Давыдов В.В., Ерохин П.М. Исследование гиперповерхности мощностей установившихся режимов электрической системы.....	101
❏ Клер А.М., Жарков П.В., Епишкин Н.О. Оптимизационные исследования угольного энергоблока на повышенные параметры пара мощностью 660 МВт.....	107
❏ Лачков Г.Г., Санеев Б.Г. Обеспечение экологически чистого энергоснабжения при развитии ТЭС региона.....	115
❏ Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Использование термодинамических пределов в энергетических исследованиях.....	124
❏ Такайшвили Л.Н., Соколов А.Д., Батхуяг Содовын. Перспективы развития угольной энергетики Монголии.....	137
❏ Хоютанов А.М., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Кобылин В.П. Учет промежуточного отбора мощности в математической модели полуволновой линии электропередачи.....	148



Металлургия и материаловедение

❏ Лебедев А.Б., Утков В.А., Бажин В.Ю. Применение красного шлама в качестве модификатора при грануляции металлургических шлаков.....	158
❏ Немчинова Н.В., Радионов Е.Ю., Сомов В.В. Исследование влияния формы рабочего пространства на МГД-параметры работы электролизера производства алюминия.....	169
❏ Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Минеев Г.Г., Давлатов Х.Ё. Технология извлечения золота и серебра из упорного золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон».....	179
❏ Савченков С.А., Уголков В.Л. Получение лигатур магний-цинк-редкоземельный металл в расплаве солей.....	187

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 1

2019

CONTENTS



Mechanical Engineering and Machine Science

- | | |
|--|----|
| ☒ Vulykh N.V., Gaysin S.N. Comparison of application efficiency of multi-disk grinding heads when forming the sealing surface of the pipeline fitting gate valve..... | 8 |
| ☒ Vuong Quang Truc, Kovrigina I.V., Eliseev S.V., Kibirev Yu.V. Technological vibrating machines – new approaches in dynamic state estimation and adjustment. Part I..... | 16 |
| ☒ Zaides S.A., Nguyen Van Hinh, Pham Van Anh. Comparison of surface layer quality and performance characteristics of parts reinforced by various methods of surface plastic deformation..... | 28 |
| ☒ Zvezdin V.A., Nizhegorodov A.I. Assessing energy efficiency of electric furnace suspended heating system for bulk material heat treatment..... | 41 |
| Kostin P.N., Lukyanov A.V. Spindle rotation speed adjustment when milling by system numerical modeling data: device-tool-workpiece..... | 54 |



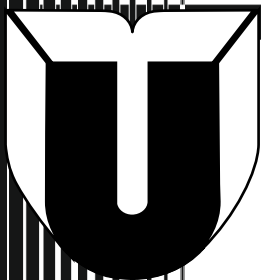
Power Engineering

- | | |
|--|-----|
| ☒ Alferov I.V., Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A. Analysis of accident rate and reasons of condensing unit failures in electrical energy supply system of oil and gas production..... | 63 |
| ☒ Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev M.V. Use of all-mode modeling complex for power systems with distributed generation..... | 75 |
| ☒ Bolshanin G.A. Determination methods of electric parameters considering the electric energy wave transmission theory..... | 90 |
| ☒ Davydov V.V., Erokhin P.M. Studying power hypersurface of power system steady states..... | 101 |
| ☒ Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Optimization study of the 660 MW coal-fired power unit for elevated steam parameters..... | 107 |
| ☒ Lachkov G.G., Saneev B.G. Providing environmentally friendly energy supply when developing regional TPP..... | 115 |
| ☒ Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Use of thermodynamic limits in energy researches..... | 124 |
| ☒ Takaishvili L.N., Sokolov A.D., Batkhuyag Sodovyn. Development prospects of coal-fired power industry in Mongolia..... | 137 |
| ☒ Khoyutanov A.M., Davydov G.I., Vasiliev P.F., Kobylin V.P. Accounting of intermediate power take-off in the mathematical model of the half-wavelength transmission line..... | 148 |



Metallurgy and Materials Science

- | | |
|--|-----|
| ☒ Lebedev A.B., Utkov V.A., Bazhin V.Yu. Use of red mud as a modifier in granulation of metallurgical slags..... | 158 |
| ☒ Nemchinova N.V., Radionov E.Yu., Somov V.V. Studying working space form effect on electrolyzer MHD parameters at aluminum production..... | 169 |
| ☒ Rakhmanov O.B., Aksenov A.V., Mineev G.G., Davlatov Kh.E. Technology of gold and silver extraction from refractory gold-arsenic flotation concentrate of Ikkijelon deposit (Republic of Tajikistan)..... | 179 |
| ☒ Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. Mg-Zn-REM master alloy production in molten salts..... | 187 |



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.

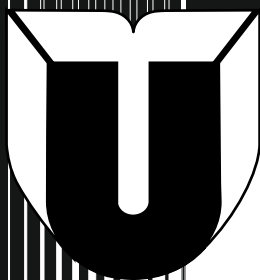
«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую 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 621.818

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-8-15>

Сравнение эффективности использования многодисковых шлифовальных головок при формировании уплотнительной поверхности затворного узла трубопроводной арматуры

© Н.В. Вулых, С.Н. Гайсин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель работы – экспериментальное сравнение эффективности использования многодисковых шлифовальных головок, формирующих и восстанавливающих уплотнительные поверхности запорной трубопроводной арматуры на примере детали, имитирующей «седло» клапана низкого давления DN 65. Эксперименты по уплотнению контактных поверхностей в затворном узле клапана осуществлены с помощью шлифовальных головок с тремя и пятью рабочими дисками. Увеличение числа рабочих дисков в многодисковых шлифовальных головках с 3-х до 5-ти повысило качество обработанной поверхности за счет снижения отклонения от плоскости для абразивного инструмента фирмы EFCO с 6,57 до 5,14 мкм; для шлифовальной шкурки Л251СМ40 – с 8,14 до 7,14 мкм, а также снижения усредненного значения параметра шероховатости Ra с (0,226–0,277 мкм) до (0,087–0,148 мкм) в зависимости от типа абразивной шкурки. Увеличение градиента коэффициента трения при многодисковой обработке способствует улучшению качества обработки уплотнительных поверхностей. Поскольку после обработки показатель отклонения от номинальной плоскости является определяющим, то для притирки уплотнительных поверхностей рекомендуется применять 5-дисковую шлифовальную головку с использованием абразивной шкурки EFCO, что подтверждается формированием замкнутой зоны контактных пятен на уплотнительных поверхностях деталей-свидетелей, обеспечивающих герметичность затворного узла запорной трубопроводной арматуры. Для притирки уплотнительных поверхностей рекомендуется применять 5-дисковую шлифовальную головку с использованием абразивной шкурки EFCO, обеспечивающей герметичность затворного узла запорной трубопроводной арматуры.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, уплотнительная поверхность, шлифовальные устройства, герметичность

Информация о статье: Дата поступления 17 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 18 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Вулых Н.В., Гайсин С.Н. Сравнение эффективности использования многодисковых шлифовальных головок при формировании уплотнительной поверхности затворного узла трубопроводной арматуры. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):8–15. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-8-15.

Comparison of application efficiency of multi-disk grinding heads when forming the sealing surface of the pipeline fitting gate valve

Nikolay V. Vulykh, Sergey N. Gaisin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of the paper is the experimental comparison of the application efficiency of multi-disk grinding heads forming and restoring the sealing surfaces of pipeline valves on example of the part simulating the “saddle” of DN 65 low pressure valve. Experiments on contact surface sealing in the gate valve are conducted with the use of grinding heads with three and five working disks. Increase in the number of working disks in multi-disk grinding heads from three to five has improved the quality of the processed surface by reducing the deviation from the plane for EFCO abrasive tool from 6.57 to 5.14 μm ; for L251SM40 grinding cloth – from 8.14 to 7.14 μm , as well has decreased the average value of the roughness parameter Ra from (0.226 – 0.277 μm) to (0.087 – 0.148 μm) depending on the type of the abrasive cloth. An increase in the gradient of the friction coefficient at multidisc treatment improves the processing quality of sealing surfaces. Since the deviation from the nominal plane is decisive after processing, grinding of sealing surfaces is recommended to perform with the use of a 5-disk grinding head with EFCO abrasive cloth. This is confirmed by the formation of a closed zone of contact spots on the sealing surfaces of witness parts providing the tightness of the gate valve assembly of pipeline fittings. For sealing surface lapping, it is recommended to use a 5-disc grinding head with the use of EFCO abrasive cloth, which ensures the tightness of the gate valve assembly of the pipeline fittings.

Keywords: pipeline fittings, sealing surface, grinding devices, tightness



Information about the article: Received December 17, 2018; accepted for publication January 18, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Vulykh N.V., Gaysin S.N. Comparison of application efficiency of multi-disk grinding heads when forming the sealing surface of the pipeline fitting gate valve. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1): 8–15. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-8-15.

Введение

Запорная трубопроводная арматура, предназначенная для перекрытия потока разнообразных сред (вода, пар, продукты нефтепереработки и др.), широко используется в нефтехимических, энергетических производствах, в транспортных трубопроводах различного назначения.

Анализ дефектов запорной трубопроводной арматуры (ТА), связанных с неплотностью уплотнительных поверхностей (УП) показал, что на Ангарском нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ ОАО «АНХК») около 80% всех дефектов связано с коррозией УП и (10–15) % дефектов возникает по причине их механического износа. На ТЭЦ Иркутского авиационного завода почти 90% повреждений УП затворов происходит по причине механического износа, и около 3% за счет коррозионных процессов [1, 2].

В большинстве случаев утечки среды через детали и узлы не допускаются, так как эти показатели наряду с герметичностью определяют безопасность эксплуатации ТА. Большое число теоретических данных [3–9] посвящено утечкам рабочей среды через

уплотнения типа «металл-металл» в затворных узлах запорной ТА.

Герметичность затворного узла зависит от фактической площади контакта УП в затворном узле клапана (вентиля), а суммарная фактическая площадь контакта определяется наличием на контактируемых поверхностях волнистости (неплоскостности) и шероховатости [10, 11]. При уменьшении отклонений волнистости (в первую очередь) и шероховатости увеличится площадь контакта и долговечность затворного узла клапана [12]. Обработка УП однодисковой шлифовальной головкой показала низкий уровень качества обработанных поверхностей по параметрам волнистости и шероховатости [1, 2].

Целью исследования является экспериментальное сравнение эффективности применения многодисковых шлифовальных головок, формирующих и восстанавливающих уплотнительные поверхности запорной трубопроводной арматуры на примере детали, имитирующей «седло» клапана низкого давления DN 65.

Материал и методы исследования

Эксперименты были проведены с помощью шлифовальных головок с тремя и пятью рабочими дисками.

Исследуемые образцы – детали-свидетели (рис. 1), имитирующие «седло» клапана низкого давления, были изготовлены из стали 20Х13 (ГОСТ 5632), твердость поверхностного слоя УП составляла 169–184 НВ.

При проведении экспериментов – с целью получения достоверных показателей – было задействовано семь опытных образцов-свидетелей.

У изготовленных на токарно-винторезном станке деталей-свидетелей (см. рис. 1) до и после операции шлифования были замерены шероховатость и отклонения от номинальной плоскости УП. Волнистость измеряли машиной модели ACCURA_MASS методом автоматического сканирования в 360 равномерно расположенных точках контрольной окружности, т.е. через 1° . Характеристика шероховатости измерялась профилометром Surtronic (производитель Фирма Taylor Hobson Ltd., Великобритания) на трех радиально ориентированных отрезках пря-

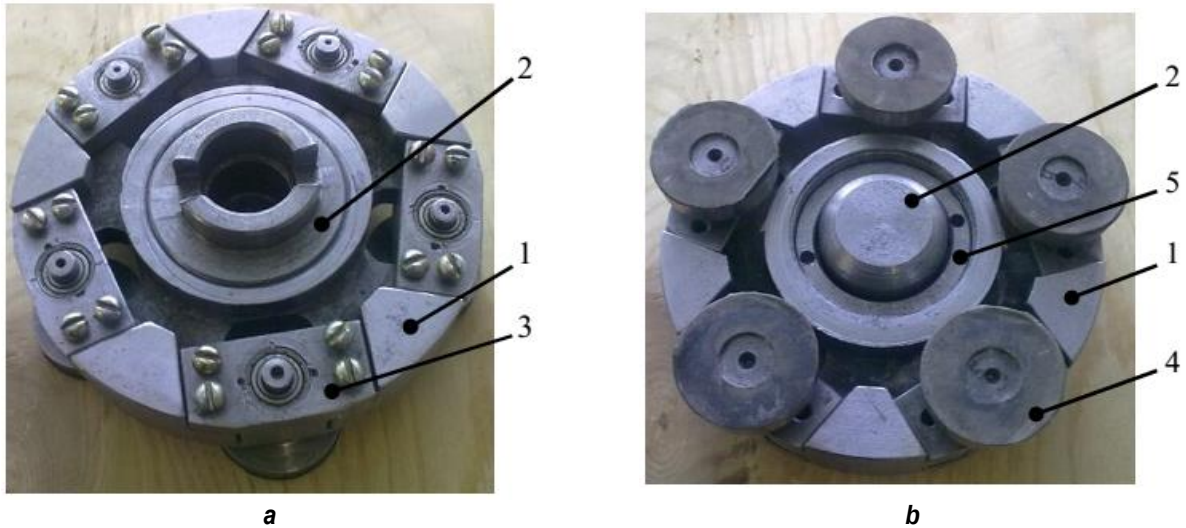


Рис. 2. Пятидисковая шлифовальная головка: а – вид сверху; б – вид снизу; 1 – планшайба; 2 – съемная ступица; 3 – вставка; 4 – рабочий диск с абразивной шкуркой; 5 – контрольная гайка
Fig. 2. Five-disk grinding head: a – top view; b – bottom view; 1 – faceplate; 2 – removable hub; 3 – insert; 4 – working disk with abrasive cloth; 5 – control nut

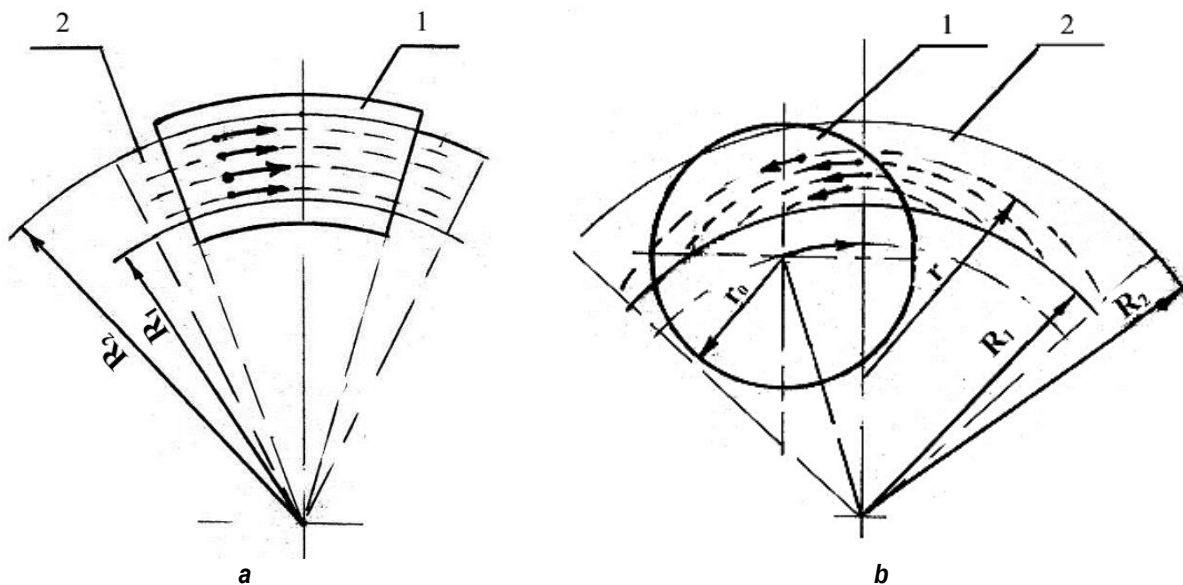


Рис. 3. Кинематика обработки деталей-свидетелей одно- (а) и многодисковыми (б) шлифовальными головками
Fig. 3. Kinematics of witness part processing by one (a) and multi-disk (b) grinding heads

$$\begin{cases} r_{min} > r_0 \text{ при } f \rightarrow 1 \\ r_{max} < (R_1 \div R_2) \text{ при } f \rightarrow 0 \end{cases} \quad (1)$$

где r_0 – радиус многодискового притира; f – коэффициент трения на контакте притира и УП.

Необходимо отметить, что в формуле (1) представлены предельные значения коэффициента трения f . Так при f , несущественно превышающем нулевое значение силы трения на контакте притира 1 по УП 2 (см. рис. 3) будут практически отсутство-

вать, и притир (теоретически) будет скользить по УП 2, описывая радиус скольжения в диапазоне равном или немного меньшем – от R_1 до R_2 . На практике [16–18], в момент касания вращающегося притира 1 и УП 2 (см. рис. 3) коэффициент трения между ними будет иметь максимальное значение – точка «К» на диаграмме (рис. 4). Затем коэффициент трения начнет снижаться вследствие приработки притира и УП – область А (см. рис. 4). В основной период обработки



силы трения стабилизируются и постепенно возрастают вследствие незначительного износа абразивных зерен – область «В» (см. рис. 4). По окончании обработки выкрашивание абразивных зерен с рабочей поверхности притира становится значительным, что приводит к увеличению контактной площади между притиром и УП, и как следствие к возрастанию коэффициента трения – область «С» (см. рис. 4), при этом радиус траектории вращения точек притира r (см.

рис. 3 б) будет стремиться к минимальному своему значению r_0 . Таким образом, изменение коэффициента трения при обработке УП имеет сложный характер, влияющий на изменение траектории перемещения точек притира, и чем это изменение будет значительней, тем с более высоким качеством будет сформирован микропрофиль обработанной поверхности за более короткий промежуток времени.

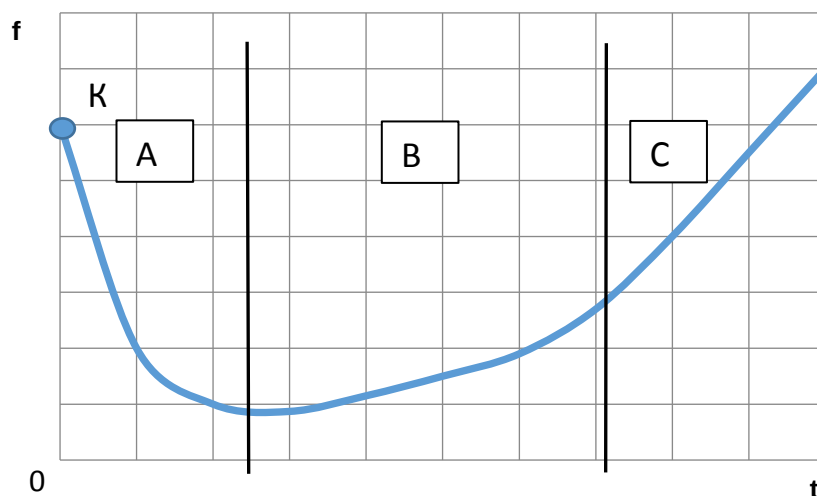


Рис. 4. Условная зависимость коэффициента трения (f) между рабочей поверхностью притира и уплотнительной поверхностью затворного узла от времени обработки (t)
Fig. 4. Conditional dependence of the friction coefficient (f) between the working surface of the lapping tool and the sealing surface of the gate valve assembly on processing time (t)

Результаты исследования и их обсуждение

Значения усредненных показателей отклонений от плоскости деталей-свидетелей Δ^{cp} , а также величина их шероховатости R_a^{cp} (2) до и после шлифования представлены в табл. 1.

$$\begin{cases} R_a^{cp} = \sum_{i=1}^7 R_{ai} / 7 \\ \Delta^{cp} = \sum_{i=1}^7 \Delta_i / 7 \end{cases} \quad (2)$$

где i – число опытов в каждой серии экспериментов.

Определение наличия замкнутой зоны уплотнительного контакта. В исследованиях [1, 2] установлено, что условие

уплотнения контактных поверхностей в затворном узле клапана будет выполняться при образовании непрерывной цепочки из хаотически разбросанных пятен контакта. Для исследования пятен контакта нанесли тонкий слой черной краски на УП отшлифованных деталей-свидетелей. На специализированной притирочной плите с использованием притирочной пасты из карбида титана произвели доводку УП с усилием 2 Н в течение 1 мин., создавая имитацию процесса запираания поверхностей затвора. Формирование белых контактных пятен УП представлено на рис. 5.



Таблица 1

Показатели качества уплотнительной поверхности при обработке
многодисковыми шлифовальными головками

Table 1

Indicators of sealing surface quality when processed by multi-disk grinding heads

Показатели качества уплотнительной поверхности	R_a^{cp} , мкм	Δ^{cp} , мкм
До шлифования УП деталей-свидетелей	4,343	23,43
Обработка деталей-свидетелей трехдисковой шлифовальной головкой:	–	–
• после шлифования абразивной шкуркой Л251СМ40 ГОСТ 10054-82	0,226	8,14
• после шлифования абразивной шкуркой EFCO	0,277	6,57
Обработка деталей-свидетелей пятидисковой шлифовальной головкой:	–	–
• после шлифования абразивной шкуркой Л251СМ40 ГОСТ 10054-82	0,087	7,14
• после шлифования абразивной шкуркой EFCO	0,148	5,14



a



b

Рис. 5. Формирование белых контактных пятен уплотнительных поверхностей деталей-свидетелей:
a – после обработки трехдисковой шлифовальной головкой с абразивной шкуркой EFCO; b – после
обработки пятидисковой шлифовальной головкой с абразивной шкуркой EFCO

Fig. 5. Formation of white contact spots on the sealing surfaces of witness parts:
a – after processing by a three-disk grinding head with EFCO abrasive cloth;
b – after processing by a five-disk grinding head with EFCO abrasive cloth

Анализируя представленные образцы (см. рис. 5), очевидно, что область белых контактных пятен, формирующих замкнутую зону на УП, образуется на деталях-свидетелях, обработанных пятидисковой шлифовальной головкой с использованием

абразивной шкурки EFCO. Таким образом, опытная конструкция пятидисковой шлифовальной головки, при использовании абразивной шкурки EFCO, соответствует своему функциональному назначению.

Заключение

1. Увеличение числа рабочих дисков в многодисковых шлифовальных головках с 3-х до 5-ти повысило качество обработанной поверхности за счет снижения отклоне-

ния от плоскости для абразивного инструмента фирмы EFCO с 6,57 до 5,14 мкм; для шлифовальной шкурки Л251СМ40 – с 8,14 до 7,14 мкм, а также снижения усредненного



значения параметра шероховатости Ra с (0,226–0,277 мкм) до (0,087–0,148 мкм) в зависимости от типа абразивной шкурки.

2. Увеличение градиента коэффициента трения при многодисковой обработке способствует улучшению качества обработки уплотнительных поверхностей.

3. Поскольку после обработки показатель отклонения от номинальной плоско-

сти является определяющим, то для притирки уплотнительных поверхностей рекомендуется применять 5-дисковую шлифовальную головку с использованием абразивной шкурки EFCO, что подтверждается формированием замкнутой зоны контактных пятен на уплотнительных поверхностях деталей-свидетелей, обеспечивающих герметичность затворного узла запорной ТА.

Библиографический список

1. Гайсин С.Н., Зайдес С.А. Условие внутренней герметичности затворов трубопроводной арматуры // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 6 (89). С. 45–49.
2. Zaides S.A., Gaisin S.N. Creating sealing surface of shutoff assembly of pipeline fittings // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. P. 106–110.
3. Гуревич Д.Ф. Основы расчета трубопроводной арматуры. М.-Л.: Машгиз, 1962. 411 с.
4. Калашников В.А. Оборудование и технологии ремонта трубопроводной арматуры. М.: Машиностроение, 2001. 232 с.
5. Сейнов С.В. Трубопроводная арматура. Исследования. Производство. Ремонт. М.: Машиностроение, 2002. 392 с.
6. Pogodin V.K., Livshits V.I. Determination of structural and technological parameters of detachable joints // Chemical and Petroleum Engineering. 2005. Vol. 41. № 1-2. P. 81–84.
7. Pogodin V.K. Provision for airtightness of detachable joints in high-pressure equipment // Chemical and Petroleum Engineering. 2001. Vol. 37. № 9-10. P. 462–467.
8. Гайсин С.Н., Балакирев В.А., Цвик Л.Б., Безносков С.А. Универсальная многодисковая головка для финишной обработки плоских уплотнительных поверхностей элементов трубопроводной арматуры // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 11. С. 8-15.
9. Пат. № 159212, Российская Федерация. У1. МПК В24В 15/00. Устройство для шлифования и притирки уплотнительных поверхностей запорной трубопроводной арматуры / С.Н. Гайсин, С.А. Зайдес, Л.Б. Цвик. № 2015123513/02. Заявл. 17.06.2015. Опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4.
10. Вулых Н.В., Горбунов А.В. Центробежное обкатывание нежестких валов для достижения минимальной шероховатости и максимальной несущей способности поверхности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 10 (69). С. 34–39.
11. Кондрашов Ю.И., Сергеев Р.Н. О некоторых вопросах оценки герметичности клапанных уплотнений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 3. С. 155–164. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-155-164
12. Скрыбин В.А. Этапы обработки при восстановлении запорных деталей трубопроводной арматуры // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26. № 2. С. 228–245.
13. Гайсин С.Н., Цвик Л.Б., Балакирев В.А. Формирование уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры однодисковыми и многодисковыми шлифовальными головками // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 5. С. 44–50.
14. Zaides S.A., Gaisin S.N. Mobile System for Restoring the Sealing Surfaces of Pipeline Valves // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No. 6. P. 442–445.
15. Зайдес С.А., Гайсин С.Н. Восстановление уплотнительной поверхности затворных узлов трубопроводной арматуры // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 11. С. 15–21.
16. Александров И.К. Определение соотношения между коэффициентами трения покоя и трения скольжения фрикционной пары // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. тр. 8-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. 2018. С. 13–18.
17. Логинов Д.В., Мясин М.И., Фоминых А.В. Стенд для испытаний образцов на трение и износ // Техническое обеспечение технологий производства сельскохозяйственной продукции: сб. статей по материалам II Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. 2018. С. 25–29.
18. Ряховский А.М. К расчету износостойкости металлических материалов трущихся пар. Сообщение 4. Определение коэффициента трения и давления на абразивном контакте // Вестник машиностроения. 2010. № 8. С. 29–36.

References

1. Gaisin S.N., Zaides S.A. Inner pressure-tight condition of pipeline valves. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 6 (89), pp. 24–27. (In Russian)
2. Zaides S.A., Gaisin S.N. Creating sealing surface of shutoff assembly of pipeline fittings. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017, pp. 106–110.
3. Gurevich D.F. *Osnovy rascheta truboprovodnoy armatury* [Bases of pipeline valves calculation]. Moscow, Leningrad: Mashgiz Publ., 1962, 411 p. (In Russian)
4. Kalashnikov V.A. *Oborudovanie i technology remonta*



truboprovodnoy armatury [Equipment and technologies for pipeline valve repair]. Moscow: Mechanical engineering Publ., 2001, 232 p. (In Russian)

5. Seynov S.V. *Truboprovodnoy armature. Issledovaniya. Proizvodstvo. Remont* [Pipeline valves. Researches. Production. Repair]. Moscow: Mechanical engineering Publ., 2002, 392 p. (In Russian)

6. Pogodin V.K., Livshits V.I. Determination of structural and technological parameters of detachable joints. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2005, vol. 41, no. 1-2, pp. 81–84.

7. Pogodin V.K. Provision for airtightness of detachable joints in high-pressure equipment. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2001, vol. 37, no. 9-10, pp. 462–467.

8. Gaisin S.N., Balakiriev V.A., Zvik L.B., Beznosov S.A. Universal multi-disk head for finishing flat sealing surfaces of pipeline valves elements. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2011, no. 11, pp. 8–15. (In Russian)

9. Gaisin S.N., Zaides S.A., Zvik L.B. *Ustroystvo dlay shlifovaniya i prytyrky uplotnitelnykh poverkhnosty zapornoy truboprovodnoy armatury* [The device for grinding and reseating of sealing surfaces of valves and fittings]. Patent RF, no. 159212, 2016. (In Russian)

10. Vulykh N.V., Gorbunov A.V. Centrifugal rolling of nonrigid shafts to achieve minimum roughness and maximum surface bearing capacity. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 2012, no. 10(69), pp. 34–39. (In Russian)

11. Kondrashov Yu.I., Sergeev R.N. Advanced methods for assessing sealing ability of valve seals. *Vestnik Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017, vol. 16, no. 3, pp. 155–164. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-155-164. (In Russian)

12. Scrybikov V.A. The processing steps in the renew of plug forming details of pipeline fittings. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin], 2016, vol. 26, no. 2, pp. 228–245. (In Russian)

13. Gaisin S.N., Zvik L.B., Balakiriev V.A. Forming sealing areas of pipeline valves by single and multiple disk grinding heads. *Izvestiya vyshih uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 5, pp. 44–50. (In Russian) DOI 10.18698/0536-1044-2012-5. (In Russian)

14. Zaides S.A., Gaisin S.N. Mobile System for Restoring the Sealing Surfaces of Pipeline Valves. *Russian Engineering Research*. 2018, vol. 38, no. 6, pp. 442–445. (In Russian)

15. Zaides S.A., Gaisin S.N. Restoration of the sealing surface valve components of pipeline valves. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Reconditioning. Modernization], 2017, no. 11, pp. 15–21. (In Russian)

16. Aleksandrov I.K. *Opredelenie sootnosheniya mezhdu koefitsientami treniya pokoy i treniya skolzheniya friktsionnoi pary* [Determination of the ratio between the coefficients of static friction and a sliding friction of frictional couple]. *Sbornik nauchnykh trudov 8 Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennyye innovatsii v nauke i tekhnike"* [The collection of scientific articles of 8 of the All-Russian scientific and technical conference with international participation "Modern innovations in science and technology"]. 2018, pp. 13–18. (In Russian)

17. Loginov D.V., Mylin M.I., Fominykh A.V. *Stend dly ispytaniy na trenie i iznos* [Test bench for testing samples for friction and wear]. *Sbornik statey po materialam 2 Vserossiyskoy (natsionalnoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii "Tekhnicheskoye obespecheniye tekhnologiy proizvodstva sel'skokhozyaystvennoy produktsii"* [Collection of articles on the materials of II All-Russian (national) scientific and practical conference "Technical support of agricultural products production technologies"]. 2018, pp. 25–29. (In Russian)

18. Rychovskiy A.M. On calculation of wearing capacity of metal materials of friction pairs. Report 4. Determination of the friction coefficient and of pressure on abrasive contact. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2010, no. 8, pp. 29–36. (In Russian)

Критерии авторства

Вулых Н.В., Гайсин С.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Vulykh N.V., Gaisin S.N. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вулых Николай Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, e-mail: vulix2011@yandex.ru

Гайсин Сергей Николаевич, заведующий лабораториями кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: gaisinsn@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolai V. Vulykh, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Machine -Building Technologies and Materials, e-mail: vulix2011@yandex.ru

Sergey N. Gaisin, Head of the Laboratories of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Productions, e-mail: gaisinsn@mail.ru



Оригинальная статья / Original article
УДК 621.534, 62.752.833; 888.6
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-16-27>

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

© К.Ч. Выонг*, И.В. Ковригина**, С.В. Елисеев***, Ю.В. Кибирев****

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

**Забайкальский институт железнодорожного транспорта ИргУПС, г. Чита, Российская Федерация

***АО «Труд», г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Развивается методологический базис процессов оценки, корректировки, контроля и изменения динамических состояний механических колебательных систем. Цель предлагаемых исследований заключается в разработке метода оценки и изменения динамических свойств технических объектов на основе введения в базисные механические колебательные структуры дополнительных связей. Показано, что такие связи могут быть реализованы рычажными механизмами, вводимыми в исходную структуру. Используются методы структурного математического моделирования, в рамках которых механическая колебательная система интерпретируется как эквивалентная в динамическом отношении система автоматического управления. Разработан метод построения математических моделей, предложены технологии построения передаточных функций системы. Введено понятие передаточных функций межпарциальных связей, на основе которых построена технология определения аналитических соотношений, определяющих возможности получения вибрационных полей с заданными свойствами. Предложены варианты выбора настроечных параметров вибрационных полей, изучены особенности динамических свойств и новых динамических эффектов, отражающих специфику динамических взаимодействий элементов системы. Приводятся результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: технологические машины, рабочий орган, вибрационное поле, настройка и коррекция форм динамического взаимодействия элементов, распределение амплитуд колебаний

Информация о статье: Дата поступления 21 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 25 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 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 I. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):16–27. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-16-27.

Technological vibrating machines – new approaches in dynamic state estimation and adjustment. Part I

Vuong Quang Truc, Inna V. Kovrigina, Sergey V. Eliseev, Yuri V. Kibirev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Transbaikal Institute of Railway Transport of Irkutsk State Transport University, Chita, Russian Federation

Trud JSC, 5a, Akademicheskaya St., Irkutsk 664017, Russian Federation

Abstract: The paper deals with the methodological foundation for the processes of estimation, adjustment, monitoring and changing of the dynamic states of mechanical oscillatory systems. The purpose of the proposed studies is to develop a method for estimation and variation of the dynamic properties of technical objects on the basis of additional ties introduction into basic mechanical vibrational structures. It is shown that such ties can be implemented by lever mechanisms introduced into the original structure. The methods of structural mathematical modeling are used, within which a mechanical oscillatory system is treated as a dynamically equivalent automatic control system. A method of mathematical modeling has been developed and technologies for constructing the transfer functions of the system have been proposed. The concept of inter-partial tie transfer functions is introduced on the basis of which a technology for determining analytical relationships defining the possibilities of obtaining vibration fields with specified properties is developed. The choices for vibration field adjusting parameters are offered. The features of dynamic properties and new dynamic effects reflecting the specificity of dynamic interactions of system elements are studied. The results of numerical experiments are provided.

Keywords: technological machines, working body, vibrational field, setting and adjustment of element dynamic interaction forms, oscillation amplitude distribution

Information about the article: Received December 21, 2018; accepted for publication January 25, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Vuong Quang Truc, Kovrigina I.V., Eliseev S.V., Kibirev Yu.V. Technological vibrating machines – new ap-



proaches in dynamic state estimation and adjustment. Part I. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):16–27. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-16-27.

Введение

Многие технические объекты, задействованные в производственных процессах как технологические вибрационные машины, оборудование и транспортные средства, работают в условиях интенсивного динамического нагружения, что предопределяет повышенное внимание к вопросам обеспечения надежности и безопасности эксплуатации систем [1–4]. Детализация подходов в оценке динамических свойств основана на специфике решения задач динамики, которые отличаются разнообразием. Выбор направлений исследований, оценок и расчета конкретных форм динамических взаимодействий элементов связан с построением математических моделей, учитывающих особенности технологических процессов [5–7]. В этом плане технологические машины для реализации вибрационных процессов отличаются особенностями, которые проявляются в требованиях обеспечения создания рабочими органами вибростендов, определенных форм вибрационных полей [8–11].

В качестве расчетных схем таких технических объектов обычно используются механические колебательные системы с двумя степенями свободы с массоинерционным элементом в виде твердого тела на упругих опорах, совершающего плоские колебательные движения. Важным фактором динамического качества таких систем является возможность обеспечения вибрационных полей или структур распределения амплитуд колебаний точек рабочего органа с возможностями управления процессами формообразования соотношений амплитуд.

В предлагаемой статье развивается метод построения системы управления динамическим состоянием технологической вибрационной машины при введении дополнительных связей, реализуемых механизмами для преобразования движения элементов; разработана технология построения математических моделей в рамках метода структурного математического моделирования.

Некоторые особенности исходной механической системы. Постановка задачи исследования

Вопросам построения математических моделей механических колебательных систем с несколькими степенями свободы, рассматриваемых в качестве расчетных схем технических систем различного назначения, посвящено достаточно большое количество работ [12–15], в которых развиты методологические основы отображения особенностей влияния на динамическое состояние технических объектов, введения различных связей, приводящих к существенным изменениям в динамику взаимодействия элементов систем. Такие связи приводят к появлению новых динамических эффектов, режимов и состояний, которые могут быть использованы в практических приложениях для изучения динамического качества и повышения эффективности работы технологического оборудования.

Расчетная схема технологического объекта с дополнительными связями, реализуемыми несколькими механизмами, представлена на рис. 1. Объект, динамическое состояние которого оценивается (или рабочий орган технологической вибрационной машины), рассматривается как твердое тело (массой M и моментом инерции J), совершающее плоские колебания. Движение объекта описывается координатами y_1 и y_2 в системе координат, связанной с неподвижным базисом. Твердое тело (M , J) опирается на упругие элементы с жесткостями k_1 , k_2 , k_3 , k_4 . Кроме рычажных механизмов с пригрузами m_1 и m_2 , в систему введена дополнительная связь в виде устройства для преобразования движения (УПД) на основе винтового несамотормозящегося механизма с приведенной массой L_1 [16, 17]. Система в целом совершает под действием син-



фазных гармонических силовых возмущений Q_1 и Q_2 малые колебания относительно положения статического равновесия; при этом силы сопротивления не учитываются; полагается, что система обладает линейными свойствами.

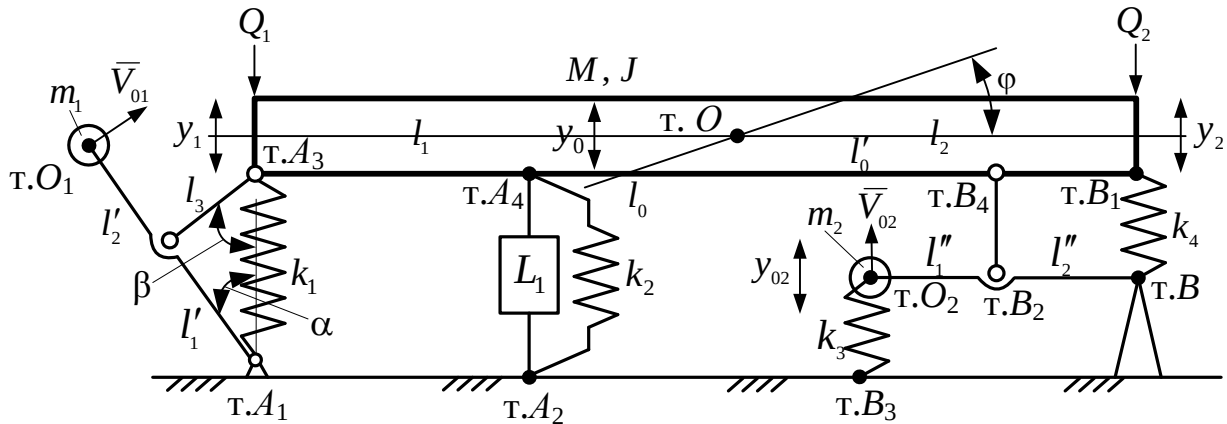


Рис. 1. Расчетная схема технологической вибрационной машины с дополнительными связями (расширенный набор)

Fig. 1. Analytical model of a technological vibrating machine with additional ties (extended set)

1. Для построения математической модели составим выражения для кинетической и потенциальной энергий системы в координатах y_1 и y_2 , связанных с неподвижным базисом:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} L_1 \dot{y}_{A_4}^2 + \frac{1}{2} m_1 V_{01}^2 + \frac{1}{2} m_2 V_{02}^2, \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 y_{A_4}^2 + \frac{1}{2} k_3 y_{02}^2 + \frac{1}{2} k_4 y_2^2, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} y_0 &= ay_1 + by_2, \quad \varphi = c(y_2 - y_1), \quad y_{A_4} = y_0 - l_0 \varphi, \\ y_1 &= y_0 - l_1 \varphi, \quad y_2 = y_0 + l_2 \varphi, \quad y_{B_4} = y_0 + l'_0 \varphi, \quad y_{O_2} = iy_{B_4}, \quad i = \frac{l'_1 + l'_2}{l'_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

В соотношениях (3) принято, что

$$a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \quad b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \quad c = \frac{1}{l_1 + l_2}. \quad (4)$$

Уравнения движения строятся на основе известных технологий [15, 16]. После вспомогательных выкладок и преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях система уравнений в операторной форме в системе координат $\bar{y}_1, \bar{y}_2$ принимает вид:

$$\begin{aligned} &\bar{y}_1 [(Ma^2 + Jc^2 + m_1 b_{01}^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)^2 + L_1 (a + l_0 c)^2] p^2 + \\ &\quad + \bar{y}_1 [k_1 + k_2 (a + l_0 c)^2 + k_3 i^2 (a - l'_0 c)^2] + \\ &\quad + \bar{y}_2 [(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + \\ &\quad \bar{y}_2 [k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)] = \bar{Q}_1, \end{aligned} \quad (5)$$



$$\begin{aligned} & \bar{y}_2[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2 (b + l'_0 c)^2 + L_1 (b - l_0 c)^2] p^2 + \\ & + \bar{y}_2[k_4 + k_2 (b - l_0 c)^2 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)^2] + \\ & + \bar{y}_1[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + \\ & \bar{y}_1[k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)] = \bar{Q}_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Связь между скоростями V_{01} и $\dot{y}_1$ определяется соотношением

$$\dot{y}_{01} = b_{01} \cdot \dot{y}_1, \quad (7)$$

где

$$b_{01} = \frac{i_2 \cos \beta (1 + i_1)}{\sin \alpha (\cos \alpha + i_2 \cos \beta)}, \quad (8)$$

где $i_1 = \frac{l'_2}{l'_1}$, $i_2 = \frac{l_3}{l'_1}$. Для определения коэффициента b_{01} , связывающего скорости V_{01} и $\dot{y}_1$ использовалась схема с мгновенным центром скоростей, как приведено в работе [17].

Коэффициенты уравнений (5), (6) представлены в операторной форме (таблица).

2. На рис. 2 показана структурная математическая модель (структурная схема) исходной схемы по рис. 1.

Структурная схема исходной системы состоит из двух парциальных блоков, которые соединены звеньями упруго-инерционной природы, что отличает систему от ее обычного вида, где аналогичное звено реализуется типовым дифференцирующим элементом второго порядка с передаточной функцией

$$W_{nap}(p) = (Jc^2 - Mab)p^2. \quad (9)$$

Такая функция может быть получена при соответствующих упрощениях структурной схемы на рис. 2.

Задача исследования заключается в разработке метода изменения динамического состояния системы для реализации возможностей формирования необходимого распределения амплитуд колебаний точек рабочего органа (или вибрационного поля твердого тела).

Особенности построения математической модели системы

1. Введение дополнительных связей, как это видно из структурной схемы, приводит к формированию приведенных масс по координатам $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$, что создает возможности изменения парциальных частот, которые в данном случае становятся зависимыми от параметров вводимых дополнительных связей так, что

$$\omega^2 = \frac{k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)}{(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)}. \quad (10)$$



Коэффициенты уравнений движения системы в системе координат y_1 и y_2
Coefficients of equations of system motion in the coordinate system y_1 and y_2

a_{11}	a_{12}
$[(Ma^2 + Jc^2 + m_1 b_{01}^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)^2 + L_1 (a + l_0 c)^2] p^2 + k_1 + k_2 (a + l_0 c)^2 + k_3 i^2 (a - l'_0 c)^2$	$[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)$
a_{21}	a_{22}
$[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)$	$[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2 (b + l'_0 c)^2 + L_1 (b - l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (b - l_0 c)^2 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)^2$
Обобщенные силы	
$\bar{Q}_1$	$\bar{Q}_2$

Примечание: $p = j\omega$ – комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$); значок $\langle - \rangle$ над переменной означает ее изображение по Лапласу [15, 16].

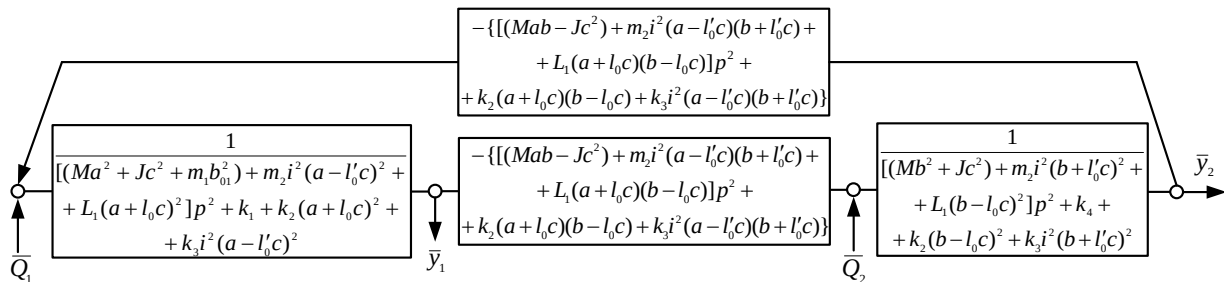


Рис. 2. Структурная математическая модель (структурная схема) по рис. 1
Fig. 2. Structural mathematical model (structural diagram) by fig. 1

Таким образом, в системе возможны появления режимов, когда движение по отдельным парциальным блокам могут совершаться независимо. Отметим, что введение дополнительных связей, их влияние на динамические свойства системы связано также с особенностями внешнего возмущения. Это объясняется тем, что кинематические воздействия или вибрации опорной поверхности формируют в системе так называемые переносные силы инерции, что должно учитываться при построении математических моделей. Ряд вопросов, связанных с детализацией представлений о влиянии дополнительных связей, изложен в работах [13, 16].

2. Рассматривается случай действия одной внешней силы $\bar{Q}_1 = \bar{Q}$ ($\bar{Q}_2 = 0$). Передаточные функции системы по внешнему воздействию $\bar{Q}$ в этом случае принимают вид:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}} = \frac{[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2 (b + l'_0 c)^2 + L_1 (b - l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (b - l_0 c)^2 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)^2}{A(p)}, \quad (11)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{-\{[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)\}}{A(p)}. \quad (12)$$



Для дальнейших исследований вводится понятие передаточной функции межпарциальной связи:

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{-\{[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2(a - l'_0c)(b + l'_0c) + L_1(a + l_0c)(b - l_0c)]p^2 + k_2(a + l_0c)(b - l_0c) + k_3 i^2(a - l'_0c)(b + l'_0c)\}}{[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2(b + l'_0c)^2 + L_1(b - l_0c)^2]p^2 + k_4 + k_2(b - l_0c)^2 + k_3 i^2(b + l'_0c)^2}. \quad (13)$$

Передаточная функция межпарциальных связей отличается от ее обычного вида в системах без дополнительных связей. Отличие заключается в том, что в обычной ситуации при действии $\bar{Q}_1 = \bar{Q}$ ($\bar{Q}_2 = 0$) режим динамического гашения колебаний может быть реализован по координате $\bar{y}_1$ на частоте

$$\omega_{\text{дин}}^2 = \frac{k_2}{Mb^2 + Jc^2}. \quad (14)$$

По координате $\bar{y}_2$ при силовом возмущении $\bar{Q}_1 = \bar{Q}$ ($\bar{Q}_2 = 0$) режим динамического гашения колебаний не создается.

3. При введении дополнительных связей режимы динамического гашения колебаний возможны по обеим координатам $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$, что следует из возможностей «обнуления» полиномов числителей в дробно-рациональных выражениях передаточных функций (11), (12).

Динамические свойства системы с дополнительными связями отличаются также и тем, что выражение для передаточной функции (13) межпарциальных связей имеет предельные значения при $p^2 \rightarrow 0$ ($p^2 = 0$), а также при $p^2 \rightarrow \infty$.

Сравнительный анализ динамических возможностей системы при введении дополнительных связей

Для сравнительного анализа возможностей изменения динамических свойств систем решается модельная задача с параметрами $M = 1000$ кг; $J = 250$ кг.м²; $k_1 = 15$ кН/м; $k_2 = 15$ кН/м; $k_3 = 15$ кН/м; $k_4 = 15$ кН/м; $L_1 = 25$ кг; $m_1 = 30$ кг; $l_1 = 0.4$ м; $l_2 = 0.6$ м; $l_0 = 0.2$ м; $l'_0 = 0.5$ м; $l''_2 = 0.1$ м.

На рис. 3 а, б приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$ (рис. 3, а) и $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$ (рис. 3 б) при варьировании передаточного отношения нижнего рычага (рис. 1) с соединенной пригрузом массой $m_2 = 30$ кг.

Отметим, что изменение передаточного отношения существенно влияет и на изменение положения частот собственных колебаний и частот динамического гашения колебаний. При этом сближение частот динамического гашения колебаний и частот собственных колебаний может рассматриваться как нежелательный фактор, обладающий потенциальной возможностью динамических выбросов, когда при близости частот собственных колебаний и частот динамического гашения колебаний из-за отклонений параметров (они могут быть приведены в природе) становятся возможными значительные броски амплитуд колебаний по координате $\bar{y}_1$.

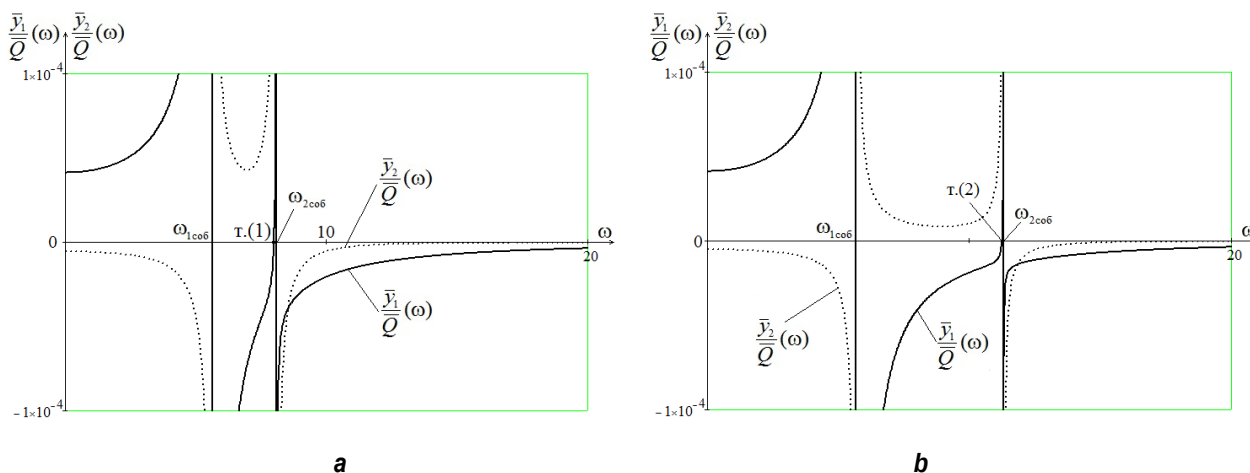


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики системы: а – при $i = 1$; б – при $i = 2$

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

Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics of the system: а – $i = 1$; б – $i = 2$

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

Передаточное отношение i является не единственным фактором корректировки динамического состояния; определенными возможностями обладают изменения величины пригрузки массой m_2 на нижнем рычаге (рис. 1), что отображается амплитудно-частотными характеристиками на рис. 4 а, б.

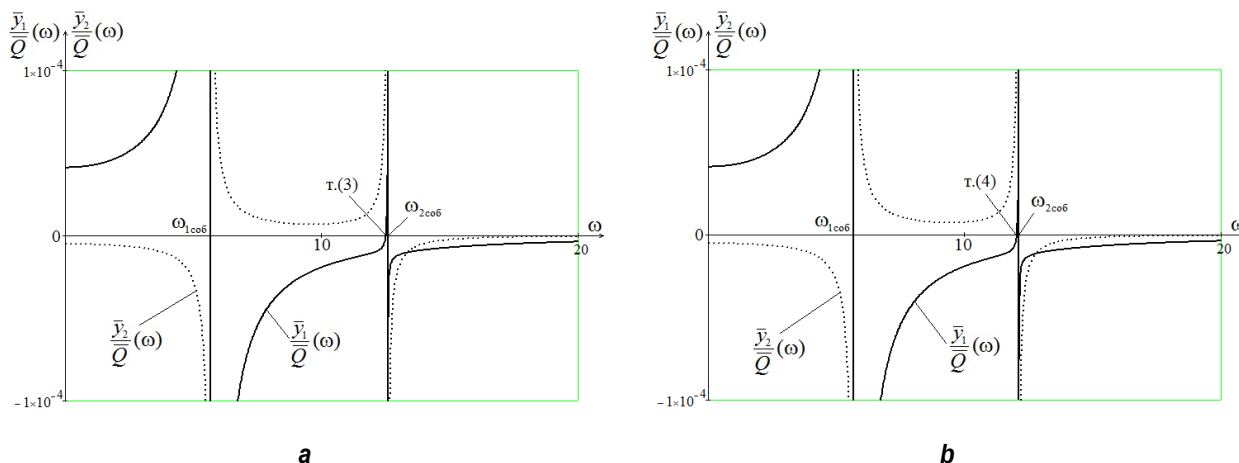


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики системы со значением $i = 2$:

а – при $m_2 = 0$; б – при $m_2 = 10$ кг

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of the system with the value $i = 2$:

а – $m_2 = 0$; б – $m_2 = 10$ kg

Совместное действие факторов силового возмущения

1. Существенное влияние на вид амплитудно-частотных характеристик оказывает совместное влияние изменения параметров m_2 и i , как показано на рис. 5. Изменение передаточного отношения рычага i и величины массы пригрузки m_2 могут изменять формы АЧХ в значительных пределах и существенно изменять параметры динамического состояния рабочего органа технологической машины.

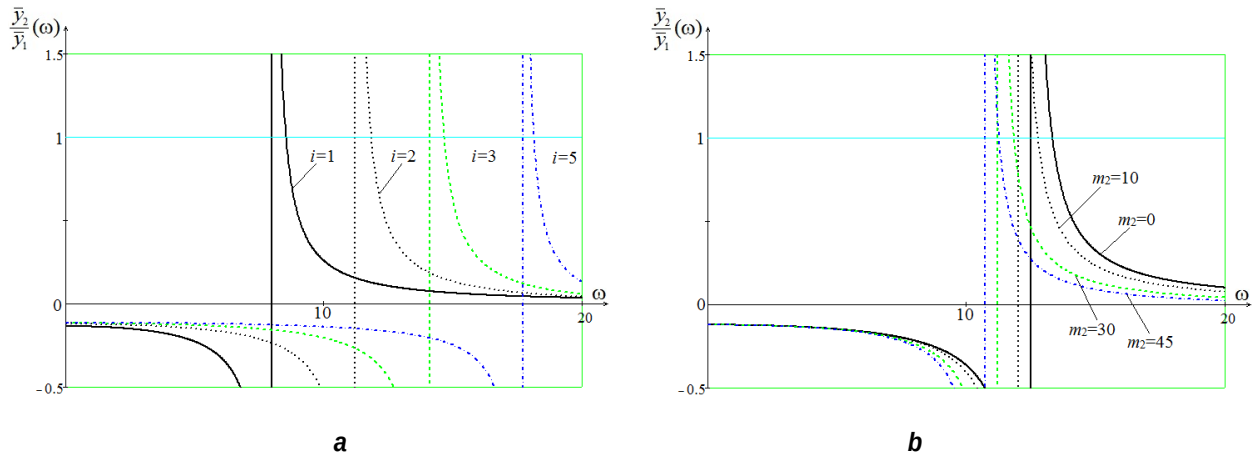


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики межпарциальной связи системы: а – со значением $m_2 = 30$ кг при разных значениях передаточного отношения рычага i ; б – со значением $i = 2$ при разных значениях массы m_2

Fig. 5. Amplitude-frequency characteristics of the system inter-partial tie: а – $m_2 = 30$ kg at different values of the lever gear ratio i ; б – $i = 2$ at different values of the mass m_2

2. При одновременном совместном действии двух внешних сил $\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 = \bar{Q}$, передаточные функции системы принимают вид:

$$W'_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}} = \frac{[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2 (b + l'_0 c)^2 + L_1 (b - l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (b - l_0 c)^2 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)^2 - \{[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)\}}{A'(p)}, \quad (15)$$

$$W'_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{[(Ma^2 + Jc^2 + m_1 b_{01}^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)^2 + L_1 (a + l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (a + l_0 c)^2 + k_3 i^2 (a - l'_0 c)^2 - \{[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)\}}{A'(p)}. \quad (16)$$

Передаточная функция межпарциальной связи может быть представлена выражением:

$$W'_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{[(Ma^2 + Jc^2 + m_1 b_{01}^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)^2 + L_1 (a + l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (a + l_0 c)^2 + k_3 i^2 (a - l'_0 c)^2 - \{[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)\}}{[(Mb^2 + Jc^2) + m_2 i^2 (b + l'_0 c)^2 + L_1 (b - l_0 c)^2] p^2 + k_4 + k_2 (b - l_0 c)^2 + k_3 i^2 (b + l'_0 c)^2 - \{[(Mab - Jc^2) + m_2 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c) + L_1 (a + l_0 c)(b - l_0 c)] p^2 + k_2 (a + l_0 c)(b - l_0 c) + k_3 i^2 (a - l'_0 c)(b + l'_0 c)\}}. \quad (17)$$



Амплитудно-частотные характеристики $\frac{\bar{y}_1}{Q}(\omega)$, $\frac{\bar{y}_2}{Q}(\omega)$ и $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}(\omega)$ приведены на рис. 6–8.

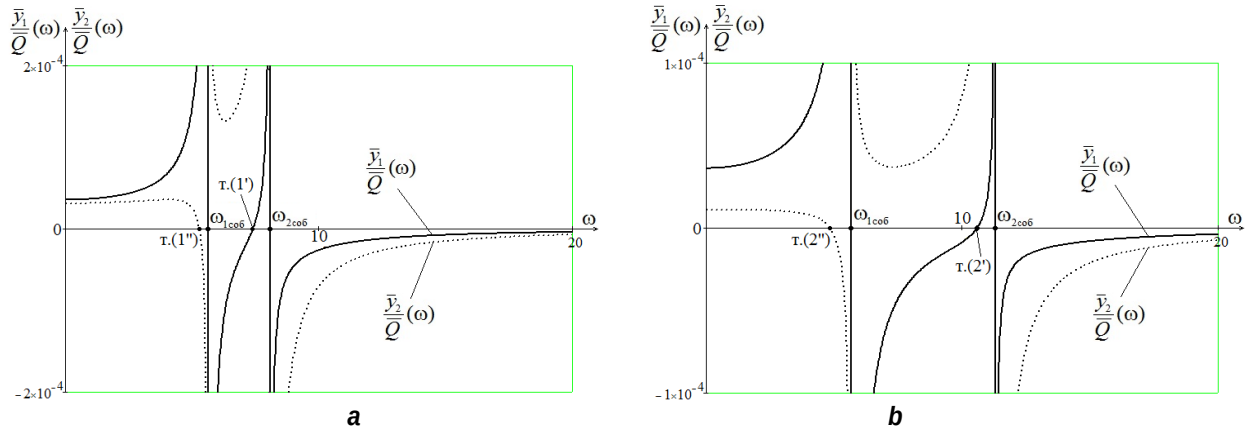


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики системы с массой $m_2 = 30$ кг:
а – при $i = 1$; б – при $i = 2$

Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of the system with the mass $m_2 = 30$ kg: а – $i = 1$; б – $i = 2$

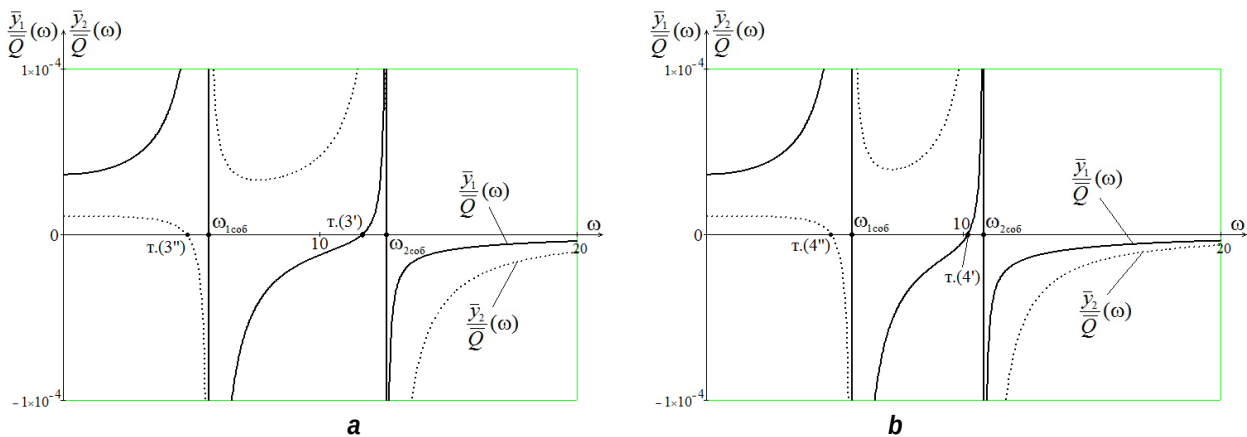


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики системы со значением $i = 2$:
а – при $m_2 = 0$; б – при $m_2 = 45$ кг

Fig. 7. Amplitude-frequency characteristics of the system with the value $i = 2$:
а – $m_2 = 0$; б – $m_2 = 45$ kg

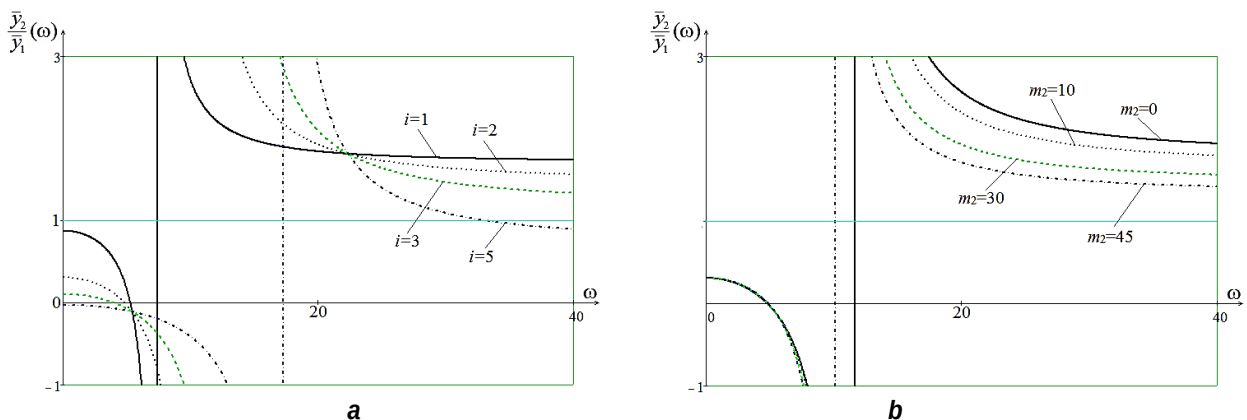


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики межпарциальной связи системы: а – со значением $m_2 = 30$ кг при разных значениях передаточного отношения рычага i ; б – со значением $i = 2$ при разных значениях массы m_2

Fig. 8. Amplitude-frequency characteristics of the system inter-partial tie: а – $m_2 = 30$ kg at different values of the lever gear ratio i ; б – $i = 2$ at different values of the mass m_2



Заключение

Предлагается метод построения математических моделей механических колебательных систем, содержащих в своем составе механизмы и устройства для преобразования движения. Введение дополнительных связей может рассматриваться как достаточно эффективный способ изменения динамических состояний рабочих органов вибрационных технологических машин. Динамическое качество вибрационных машин зависит от возможности корректировать распределения амплитуд колебаний точек рабочего органа. Авторами для оценки возможностей настройки вибрационных полей предложено использование передаточной функции межпарциальных связей. Анализ этих функций позволяет определять возможности целенаправленного формирования структур вибрационного поля. В частности удобным подходом является получение однородного вибрационного поля через поддержание отношения амплитуд колебаний граничных координат рабочего органа, равным единице.

Во второй части статьи рассматриваются более детализировано условия создания и управления структурой вибрационного поля. Библиографические ссылки делаются на используемую литературу и имеют свою нумерацию в рамках второй части статьи.

Библиографический список

1. Махутов Н.А., Петров В.П., Куксова В.И., Москвитин Г.В. Современные тенденции развития исследований по проблемам машиноведения и машиностроения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 3. С. 16–37.
2. Доронин С.В., Лупехин А.М., Москвичев В.В., Шокин Ю.И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2005. 250 с.
3. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. М.: Машиностроение, 1968. 362 с.
4. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. 176 с.
5. Фролов К.В., Фурман Ф.А., Елисеев С.В., Кашуба В.Б. Прикладная теория виброзащитных систем. М.: Машиностроение, 1980. 276 с.
6. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Кашуба В.Б. Прикладные задачи структурной теории виброзащитных систем. СПб.: Политехника, 2013. 363 с.
7. Хоменко А.П., Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та путей сообщения, 2012. 288 с.
8. Степанов В.М., До Ныи И. Обобщенная математическая модель вибрационных грохотов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 1. С. 246–251.
9. Дятчин В.З., Ляшенко В.И., Франчук В.П. Совершенствование грохотов для горнорудной промышленности // Металл Информ. 2017. № 32-33 (213-214). С. 12–15.
10. Усенко Н.А., Фам Х.Х., Свиридов А.А. Структурный и математический синтез многомассных вибрационных грузочных устройств с раздельным возбуждением колебаний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 4. С. 52–60.
11. 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.
12. Clarence W., Silva De. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC Press, 2000. 957 p.
13. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of vibration protection. Switzerland: Springer, 2016. 708 p.
14. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука, 2011. 384 с.
15. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск: Наука, 2016. 459 с.
16. 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.
17. 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.



References

1. Makhutov N.A., Petrov V.P., Kuksova V.I., Mockvitin G.V. The current trends in scientific research in the field of machine sciences and machine-building. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizastii* [Problems of Mechanical Engineering and Automation], 2008, no. 3, pp. 16–67. (In Russian).
2. Doronin S.V., Lupekhin A.M., Moskvichev V.V., Shokin Yu.I. *Modelirovanie prochnosti i razrusheniya nesushikh konstruktivnykh sistem* [Modeling strength and fracture of engineering system bearing structures]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005, 250 p. (In Russian).
3. Byikhovski I.I. *Osnovy teorii vibratsionnoy tekhniki* [Fundamentals of the theory of vibration engineering]. Moscow: Machine-Building Publ., 1968, 362 p. (In Russian).
4. Panovko G.Ya. *Dinamika vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Dynamics of vibrational technological processes]. Moscow – Izhevsk: SRC "Regular and chaotic dynamics", Institute of Computer Research Publ., 2006, 176 p. (In Russian).
5. Frolov K.V., Furman F.A. *Prikladnaya teoriya vibrozashitnykh sistem* [Applied theory of vibration protection systems]. Moscow: Machine-Building Publ., 1980, 276 p. (In Russian).
6. Belokobyl'skij S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B. *Prikladnye zadachi strukturnoy teorii vibrozashchitnykh sistem* [Applied problems of the structural theory of vibration protection systems]. Saint-Petersburg: Politehnika Publ., 2013, 363 p. (In Russian).
7. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Ermoshenko Yu.V. *Systemnyi analiz i matematicheskoe modelirovanie v mekhatronike vibrozashitnykh sistem* [System analysis and mathematical modeling in vibration protection system mechatronics]. Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering, 2012, 288 p. (In Russian).
8. Stepanov V.M., N.Y. Do. *Generalized mathematical model of vibrating screen. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the TSU. Technical sciences], 2011, no. 3, pp. 246-251. (In Russian).
9. Dyatchin V.Z., Lyashenko V.I., Franchuk V.P. Improvement of screens for mining industry. *Metal Inform* [Metal Inform], 2017, no. 32-33 (213-214), pp. 12–15.
10. Usenko N.A., Pham H.H., Sviridov A.A. Structural and mathematical synthesis of many mass net vibrating charging devices with separate excitation of vibrations. *Izvestiya Tul-GU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the TSU. Technical sciences], 2015, no. 4, pp. 52–60. (In Russian).
11. Antipov V.I., Dentsov N.N., Koshelev A.V. Dynamics of a parametrically excited vibrating machine with isotropic elastic system. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2014, no. 8 (5), pp. 1037–1042. (In Russian).
12. Clarence W., Silva De. *Vibration. Fundamentals and Practice*. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC Press, 2000, 957 p.
13. Karnovsky I.A., Lebed E. *Theory of vibration protection*. Switzerland: Springer, 2016, 708 p.
14. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. *Mekhatronnye podhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem* [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical oscillatory systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2011, 384 p. (In Russian).
15. Eliseev S.V., Artyunin A.I. *Prikladnaya teoriya kolebanij v zadachah dinamiki linejnykh mekhanicheskikh sistem* [Applied theory of oscillations in the problems of linear mechanical system dynamics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2016, 459 p. (In Russian).
16. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P., Zasyadko A.A. *Dinamicheskij sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibrozolyatsii tekhnicheskikh objektov* [Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration insulation of technical objects]. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2008, 523 p. (In Russian).
17. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Artyunin A.I., Parshuta E.A., Kaimov E.V. *Mekhanizmy v uprugikh kolebatel'nykh sistemakh: osobennosti ucheta dinamicheskikh svoystv, zadachi vibratsionnoi zashityi mashin, priborov i oborudovaniya* [Mechanisms in elastic oscillatory systems: consideration features of dynamic properties, tasks of vibration protection of machines, devices and equipment]. Irkutsk, 2013. 187 p. Dep. in VINITI RAN 15.08.2013, No. 243. (In Russian).

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 the there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вьонг Куанг Чык, аспирант, e-mail: trcvq1990@gmail.com

Ковригина Инна Владимировна, доцент, кандидат технических наук, e-mail: innabella@mail.ru

Елисеев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, директор Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования, e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Кибирев Юрий Владимирович, аспирант, главный инженер, первый заместитель генерального директора, e-mail: kibirev@zaotrud.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vuong Quang Truc, PhD student, e-mail: trcvq1990@gmail.com

Inna V. Kovrigina, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), e-mail: innabella@mail.ru

Sergey V. Eliseev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Scientific-educational center of the modern technologies, system analysis and modeling, e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Yuri V. Kibirev, PhD student, Chief Engineer, First Deputy General Director, e-mail: kibirev@zaotrud.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.787.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-28-40>

Сравнение качества поверхностного слоя и эксплуатационных характеристик деталей, упрочненных разными способами поверхностного пластического деформирования

© С.А. Зайдес, Нгуен Ван Хинь, Фам Ван Ань

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Сравнение качества поверхностного слоя образцов, обработанных новыми способами упрочнения с традиционной обкаткой роликом. Результаты работы получены на основе выполнения экспериментальных исследований. Экспериментальными исследованиями установлено, что качество поверхностного слоя, полученного при осциллирующем выглаживании, выше, чем при обкатке роликом, но ниже, чем при поперечной обкатке плоскими плитами. Шероховатость, полученная при осциллирующем выглаживании, меньше, чем при обкатке роликом, но больше, чем при поперечной обкатке плоскими плитами. Изменение размеров зерен происходит только в поверхностном слое, центральная область практически не претерпевает пластических деформаций, и зерна не изменяют своих размеров. Область значительного искажения зерен распространяется на глубину 0,1–0,2 мм при поперечной обкатке плоскими плитами и осциллирующем выглаживании, и на 0,1 мм – при обкатывании роликом. Микротвердость и твердость, полученная при осциллирующем выглаживании больше, чем при обкатке роликом, но меньше, чем при поперечной обкатке плоскими плитами. Наименьшее отклонение от круглости цилиндрических деталей получено при поперечной обкатке плоскими плитами (2,9 раза), а при обкатке роликом (2,1 раза). Максимальное осевое остаточное напряжение получено при осциллирующем выглаживании, далее при обкатывании роликом и поперечной обкатке плоскими плитами (в 1,8 раза). Однако наибольшее тангенциальное напряжение формируется при поперечной обкатке плоскими плитами, а минимальное – при осциллирующем выглаживании (в 1,3 раза). Износостойкость упрочненных образцов в несколько раз выше износостойкости образцов без упрочнения. Максимальная износостойкость наблюдается у деталей, упрочненных поперечной обкаткой плоскими плитами, а минимальная – у деталей, упрочненных обкатыванием роликом.

Ключевые слова: осциллирующее выглаживание, шероховатость, микротвердость, микроструктура, остаточное напряжение, осцилляция рабочего инструмента

Информация о статье: Дата поступления 14 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 16 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь, Фам Ван Ань. Сравнение качества поверхностного слоя и эксплуатационных характеристик деталей, упрочненных разными способами поверхностного пластического деформирования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):28–40. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-28-40.

Comparison of surface layer quality and performance characteristics of parts reinforced by various methods of surface plastic deformation

Semen A. Zaides, Nguyen Van Hinh, Pham Van Anh

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of this work is comparison of the surface layer quality of samples treated by new hardening methods and by traditional rolling with a roller. The obtained results of the work are based on experimental studies where it was found out that the quality of the surface layer obtained by oscillating burnishing is higher than the one obtained by rolling but lower than the one obtained by transverse rolling with flat plates. Grain sizes change only in the surface layer, the central region practically is not subjected to plastic deformations and the grains do not change their sizes. The area of significant grain distortion extends to the depth of 0.1–0.2 mm with transverse rolling with flat plates and oscillating burnishing and to 0.1 mm under rolling with a roller. The microhardness and hardness obtained under oscillating burnishing is more than under rolling with a roller, but less than under transverse rolling with flat plates. The smallest deviation from roundness of cylindrical parts was obtained under transverse rolling with flat plates (2.9 times), and under rolling with a roller it is 2.1 times. The maximum axial residual stress is obtained under oscillating burnishing, then under rolling with a roller and transverse rolling with flat plates (1.8 times). However, the greatest tangential stress is formed under transverse



rolling with flat plates, and the minimum stress under oscillating burnishing (1.3 times). Wear resistance of hardened samples is several times higher than the wear resistance of samples without hardening. The maximum wear resistance is characteristic of the parts reinforced by transverse rolling with flat plates, and the minimum wear resistance – of parts reinforced by rolling with a roller.

Keywords: oscillating burnishing, roughness, microhardness, microstructure, residual stress, working tool oscillation

Information about the article: Received December 14, 2018; accepted for publication January 16, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Zaides S.A., Nguyen Van Hinh, Pham Van Anh. Comparison of surface layer quality and performance characteristics of parts reinforced by various methods of surface plastic deformation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):28–40. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-28-40.

Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) является одним из наиболее простых и эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин. Упрочнение ППД приводит к повышению поверхностной твердости, образованию в поверхностных слоях деталей остаточных напряжений сжатия и благоприятному изменению микрогеометрии поверхности. В результате, в зависимости от функционального назначения и условий эксплуатации деталей, повышается их усталостная и контактная прочность, износостойкость и сопротивление коррозии, гидроплотность и маслоудерживающая способность [1–8].

В настоящее время разработано и внедрено в производство достаточно большое разнообразие методов поверхностного пластического деформирования [9–10]. Это обкатка шариком, роликом, алмазным выглаживателем, вибрационная, ультразвуковая и ударная обработка и многие другие процессы.

Благодаря технической и технологической простоте на производстве широко используют отделочно-упрочняющую обработку обкаткой роликом [3, 5]. Однако в ряде случаев, например, при упрочнении маложестких деталей типа валов, возможности такого способа весьма ограничены. При приемлемой производительности не удастся получить детали со стабильными показателями качества обработанной поверхности.

В отличие от традиционных схем обработки [9–11] в настоящее время разработаны процессы ППД, основанные на новой

кинематике деформирующего инструмента. Так, в работах [7], предложено изменить ось вращения цилиндрического ролика, которая проходит через центр диаметральной плоскости. Новая кинематика движения рабочего инструмента позволяет изменить напряженное состояние в очаге деформации и повысить степень упрочнения.

Известны работы по упрочнению цилиндрических деталей осциллирующим выглаживанием [12]. Рабочий инструмент в виде пластины с радиусным скруглением совершает осциллирующее движение не вдоль оси детали, а перпендикулярно ей. Такой способ позволяет выполнять не только отделочно-упрочняющую обработку, но и формировать регулярный микрорельеф на поверхности детали [13].

Достаточно высокое качество поверхностного слоя получается при упрочнении деталей поперечной обкаткой плоскими плитами [14]. Высокая производительность технологического процесса и высокое качество поверхностного слоя должны привлечь внимание инженеров и технологов на производстве.

Целью данной работы является сравнение качества поверхностно слоя новых способов упрочнения с традиционной обкаткой роликом.

Качество упрочняющей обработки оценено по результатам измерения шероховатости, твердости, остаточных напряжений, отклонения от круглости, размеров зерен, микроструктуры и микротвердости по глубине упрочненного слоя.



Схемы процессов

Для сопоставления качества поверхностного слоя упрочненных деталей было исследовано три способа ППД: обкатывание роликом, поперечная обкатка плоскими плитами и осциллирующее выглаживание. Образцы для исследования были упрочнены разными способами, но с одинаковой величиной радиального натяга.

На рис. 1 показаны три схемы поверхностного пластического деформирования.

В процессе обкатывания локальным индентором (роликом) заготовка вращается (n_3), а ролик, находящийся в контакте с обрабатываемой поверхностью, вместе с обкатным приспособлением совершает продольную подачу S (рис. 1 а).

дольную подачу S (рис. 1 а).

Схема процесса поперечной обкатки плоскими плитами представлена на рис. 1 б. Нижняя плита неподвижна, верхняя плита опускается вниз до значения величины обжатия, после этого верхняя плита перемещается вправо до перемещения заготовки на один оборот, то есть обработка проходит по всей цилиндрической поверхности цилиндра. Затем верхняя плита поднимается для полной разгрузки заготовки. Особенность данной схемы обработки заключается в том, что упрочняемые заготовки получают вращение и обкатываются без закрепления в центрах.

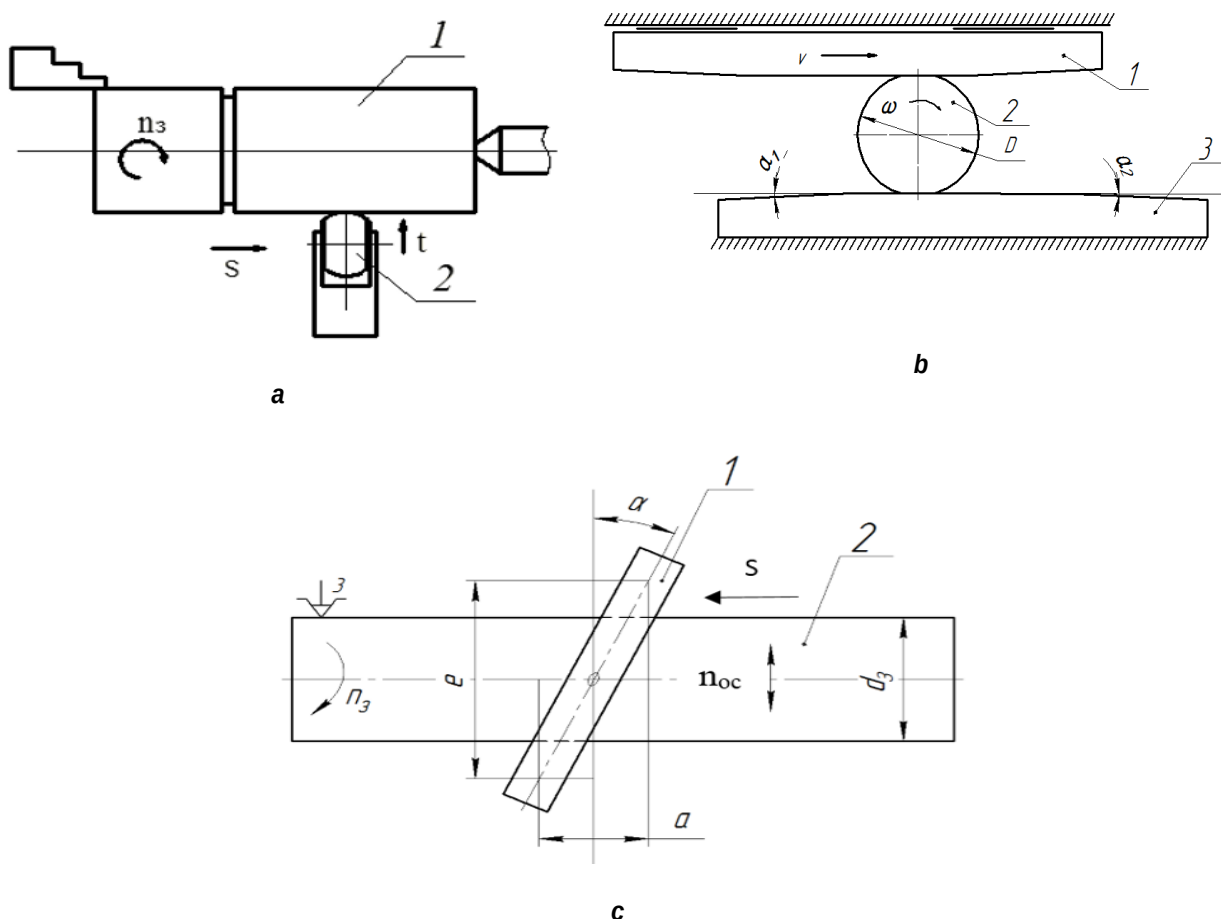


Рис. 1. Схемы технологических способов ППД: а – обкатывание роликом: 1 – заготовка, 2 – ролик; б – поперечная обкатка плоскими плитами: 1 – подвижная плита, 2 – заготовка, 3 – неподвижная плита; с – осциллирующее выглаживание: 1 – рабочий инструмент, 2 – заготовка
Fig. 1. Diagrams of technological methods of surface plastic deformation: а – rolling with a roller: 1 – workpiece, 2 – roller; б – transverse rolling with flat plates: 1 – moving plate, 2 – workpiece, 3 – stationary plate; с – oscillating burnishing: 1 – working tool; 2 – workpiece



Схема осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей представлена на рис. 1 в. В качестве рабочего инструмента использована пластина, имеющая скругление на одном из торцов по радиусу $R_{пр}$. Эта часть пластины является рабочим элементом, который прижимается к вращающейся обрабатываемой заготовке. Пластина может поворачиваться по и против вращения часовой стрелки относительно вертикальной плоскости на некоторый угол α , а также совершать осциллирующее вертикальное движение относительно оси заготовки и перемещаться в осевом направлении по направлению подачи S .

Для сопоставления качества поверхностного слоя упрочненных деталей исследование выполнено на цилиндрических образцах диаметром 20 мм, изготовленных из стали 45. Абсолютное обжатие для всех способов упрочнения приняли равным 0,1 мм.

Обкатывание проводили на токарном станке 1К62 цилиндрическим роликом из стали У10А, диаметром 30 мм с радиусом профиля $r = 5$ мм. Поперечную обкатку плоскими плитами выполняли на плоско обкат-

ном станке [14], осциллирующее выглаживание проводили на токарном станке 1К62, профильный радиус рабочего инструмента $R_{пр} = 4$ мм; материал – быстрорежущая сталь Р18.

При упрочнении образцов разными способами ППД были выбраны следующие параметры и режимы обработки: обкатка цилиндрическим роликом на токарном станке: продольная подача $S = 0,14$ мм/об, натяг $t = 0,10$ мм, частота вращения заготовки $n_3 = 100$ об/мин. Поперечную обкатку плоскими плитами проводили за 3 оборота заготовки со скоростью подвижной плиты 1,5 м/мин, натяг $t = 0,10$ мм. Режимы осциллирующего выглаживания: частота вращения заготовки $n_3 = 100$ об/мин; частота осцилляции инструмента $n_{дв.х} = 40$ дв.ход/мин; натяг $t = 0,10$ мм; амплитуда осцилляции деформирующего инструмента $e = 30$ мм; продольная подача инструмента $s = 0,14$ мм/об; угол поворота рабочего инструмента $\alpha = 45^\circ$. Приведенные режимы упрочняющей обработки приняты по литературным источникам. Такие режимы обеспечивают наилучшее качество поверхностного слоя для каждого вида упрочнения.

Результаты экспериментальных исследований

Шероховатость упрочненных деталей. Шероховатость обработанных поверхностей определена на приборе FormTalySurfi200. На каждом участке цилиндрического образца проведены измерения шероховатости в трех местах через 120° по окружности и вычислены средние значения R_a .

На рис. 2 представлен показатель шероховатости R_a в зависимости от способов обработки.

Результаты измерения показывают, что наилучшая шероховатость получена при поперечной обкатке плоскими плитами. Обкатанные детали имеют шероховатость в 6–7 раз меньше, чем шероховатость у деталей, упрочненных другими способами. Низкая шероховатость поверхности деталей при поперечной обкатке плоскими плитами связана с двумя причинами. С одной стороны, благоприятное условие контакта инстру-

мента с обрабатываемой поверхностью, а с другой – многократное действие плит на поверхностный слой.

Микроструктура. После упрочняющей обкатки цилиндрические образцы были разрезаны на отдельные диски. Микроструктуру и микротвердость поверхностного слоя определяли на шлифах, изготовленных из половины дисков толщиной 10 мм, вырезанных из цилиндрических образцов. Диаметральная плоскость диска служила объектом исследования. Образцы заливали в кольца на автоматическом прессе Полилаб С50А с помощью смолы Aka-Resin Acrylic, а затем обрабатывали на шлифовально-полировальном станке Полилаб П12М до зеркального блеска. Травление шлифов выполнили в 5%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Полученные шлифы использовали сначала для оценки микроструктуры, а

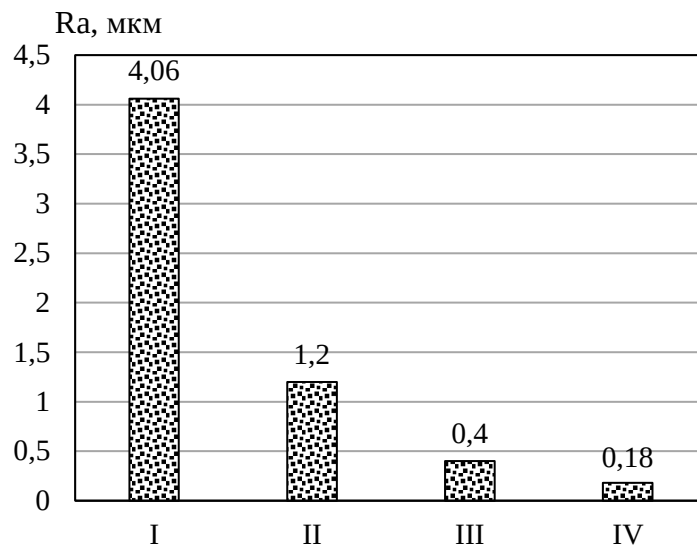


Рис. 2. Зависимость показателя шероховатости Ra в зависимости от способа обработки:
*I – исходная шероховатость поверхности; II – обкатывание роликом; III – осциллирующее
выглаживание; IV – поперечная обкатка плоскими плитами*
Fig. 2. Dependence of roughness index Ra on the machining method:
*I – initial surface roughness;
II – rolling with a roller; III – oscillating burnishing; IV – transverse rolling with flat plates*

затем для определения микротвердости поверхностного слоя.

Микроструктура металлов и сплавов характеризуется величиной зерна и его расположением, формой, размером и количеством различных фаз. Для проведения исследования микроструктуры металла использован металлографический микроскоп марки МЕТ-2, который предназначен для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом поле. С помощью программы Top View была получена и сфотографирована структура металла на экране компьютера.

На рис. 3 представлены фотоснимки микроструктуры образцов после разных способов упрочняющей обработки. Черные зерна – перлит, а белые – феррит.

Величину искажения зерен Δa определяли: $\Delta a = a_0 - a_1$,
где: a_0 – исходный размер зерна; a_1 – размер зерна после упрочнения.

Все три способа обработки ППД влияют на изменение микроструктуры в поверхностном слое. После обработки ППД происходит вытягивание зерен в направлении главной деформации и их дробление. В по-

верхностном слое пластически деформированного металла зерна образуют определенную ориентировку, создают так называемую текстуру деформации. Происходит вытягивание зерен в направлении главной деформации, о чем можно судить по микроструктуре наклепанного слоя. Из-за продольного перемещения инструмента, относительно заготовки при обкатывании роликом и осциллирующем выглаживании, зерна вытягиваются в продольном направлении более интенсивно, чем в поперечном. Продольное перемещение инструмента относительно оси заготовки формирует волну выдавливаемого металла, которая оказывает сопротивление относительному перемещению материала между инструментом и заготовкой в продольном направлении, возникает значительное продольное усилие, которое действительно вызывает деформирование зерен вдоль оси заготовки. Область значительного искажения зерен (зона а) распространяется на глубину 0,2–0,3 мм при поперечной обкатке плоскими плитами и осциллирующим выглаживанием, и до 0,1–0,2 мм – при обкатывании роликом. Зону б можно принять как исходную структуру с размером зерен, составляющим около 32 мкм.



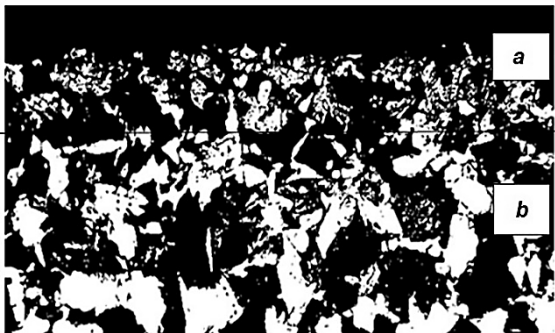
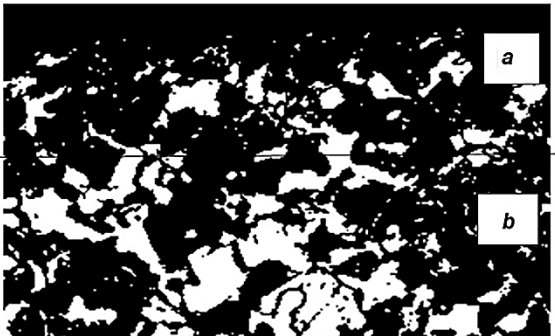
Способ обработки ППД	Микроструктура упрочненных образцов
I – Обкатывание роликом $\Delta a = 9,6$ мкм	
II – поперечная обкатка плоскими плитами $\Delta a = 13,36$ мкм	
III – Обкатка осциллирующим выглаживанием $\Delta a = 11,33$ мкм	

Рис. 3. Микроструктура упрочненных образцов при разных способах обработки ППД (увеличение 1000 раз): I – обкатывание роликом; II – поперечная обкатка плоскими плитами; III – осциллирующее выглаживание

Fig. 3. Microstructure of hardened samples under different methods of surface plastic deformation (thousandfold magnification): I – rolling with a roller; II – transverse rolling with flat plates; III – oscillating burnishing

Существенное изменение размеров зерен происходит в поверхностных слоях. При поперечной обкатке плоскими плитами размеры зерен уменьшаются в среднем в осевом направлении образца на 46,2%, а в поперечном – на 37,3%.

При осциллирующем выглаживании зерен уменьшаются, соответственно, на 38,5% и 32,7%. При обкатке роликом размеры зерен уменьшаются на 34% в поперечном и на 25,7% в продольном направлении.

Микротвердость и глубина наклепанного слоя упрочненных деталей. Микротвердость характеризует сопротивление материала пластическому вдавливанию твердого наконечника. Для определения микротвердости в России серийно выпускают прибор марки ПМТ-3, представляющий собой вертикальный микроскоп, укрепленный на массивной стойке с ленточной резьбой. В практике измерения микротвердости чаще всего применяется алмазная квадрат-



ная пирамида с углом при вершине 136° .

На рис. 4 показано распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя, которая после обработки ППД повышается на 17–22%. При данных режимах упрочнения максимальная микротвердость получена при поперечной обкатке плоскими плитами (2812 МПа). Поэтому при поперечной обкатке плоскими плитами также достигается более высокий эффект упрочнения по сравнению с локальным способом: степень упрочнения повышается на 3–4%, глубина упрочнения – на 25–60% [12]. Увеличенная твердость возникает благодаря стесненному деформированию микропрофиля в зоне контакта инструмента и заготовки.

Поверхностная твердость. Для определения твердости по Роквеллу использовали прибор марка HBRV-187.5. На каждом участке образца твердость была измерена в шести точках, расположенных на поверхности по двум окружностям. Твердость каждого участка принята как средне-

арифметическое значение твердости в шести точках.

На рис. 5 показано изменение поверхностной твердости в зависимости от способа обработки.

Наибольшая твердость получена при поперечной обкатке плоскими плитами, а наименьшая – при обкатке роликом. При этом твердость увеличивается, соответственно, на 11,9 % и 4,3 %. Это объясняется тем, что при поперечной обкатке плоскими плитами поверхностный слой деформируется многократно и в большей мере, чем при обкатке роликом. При осциллирующем выглаживании твердость повышается на 5,9% по сравнению с исходной твердостью.

Остаточные напряжения в упрочненных деталях. Для измерения остаточных напряжений использовали прибор Xstress 3000 G3/G3R. Режим измерения: хромовый анод, К- α излучение, напряжение на рентгеновской трубке – 25кВ, ток – 5,5 мА. Использовали оба детектора, коллиматор – 5 мм. Угол дифракции – $156,4^\circ$. Плоскость

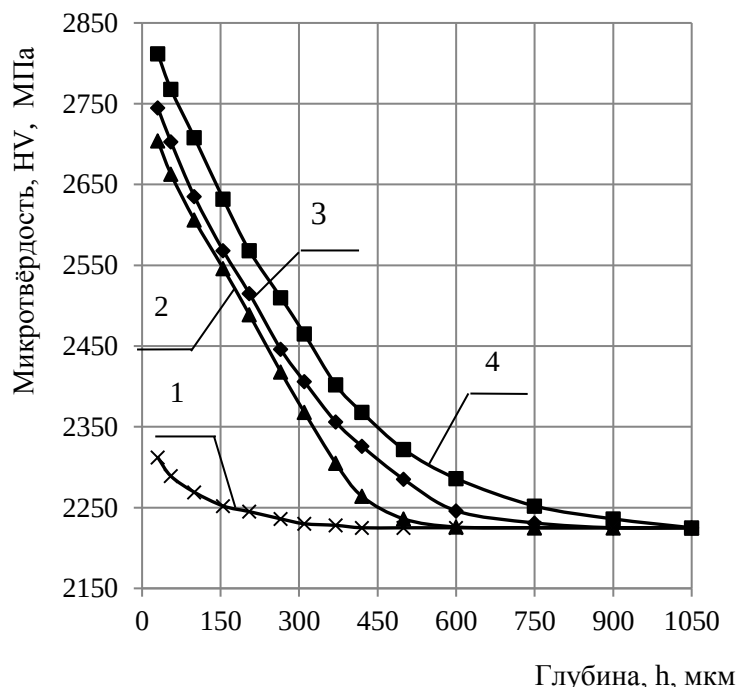


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя в зависимости от способа обработки: 1 – исходная микротвердость поверхности; 2 – обкатывание роликом; 3 – осциллирующее выглаживание; 4 – поперечная обкатка плоскими плитами

Fig. 4. Microhardness distribution over the depth of the hardened layer depending on the machining method: 1 – initial surface microhardness; 2 – rolling with a roller; 3 – oscillating burnishing; 4 – transverse rolling with flat plates



отражения (311). Количество наклонов – 8, отклонение наклона (осцилляция) $\pm 5^\circ$. Время экспозиции – 5 сек. Измерение напряжений проводили в 2-х направлениях (φ): 0° (положение гониометра вдоль образца) и 90° (положение гониометра поперек образца). Определяли нормальные напряжения одним из стандартных способов обсчета пиков Peakfit, предлагаемым программным обеспечением прибора. Для автоматизированного расчета напряжений вводили параметры материала: модуль Юнга – 210 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3. Результаты измерения остаточных напряжений рентгеновским способом представлены в таблице.

При всех трех способах обработки ППД возникают остаточные напряжения

сжатия на поверхности образцов. Максимальное осевое остаточное напряжение получено при осциллирующем выглаживании, далее при обкатывании роликом и поперечной обкатке плоскими плитами (в 1,8 раза). Однако наибольшее тангенциальное напряжение формируется при поперечной обкатке плоскими плитами, а минимальное – при осциллирующем выглаживании (в 1,3 раза), что согласуется с литературными данными [9, 10, 15].

Отклонения от круглости цилиндрических деталей. Для измерения отклонения от круглости образцов использована портальная координатно-измерительная машина (КИМ) Carl Zeiss Contura G2 Aktiv. Измерение с точностью 1 мкм было

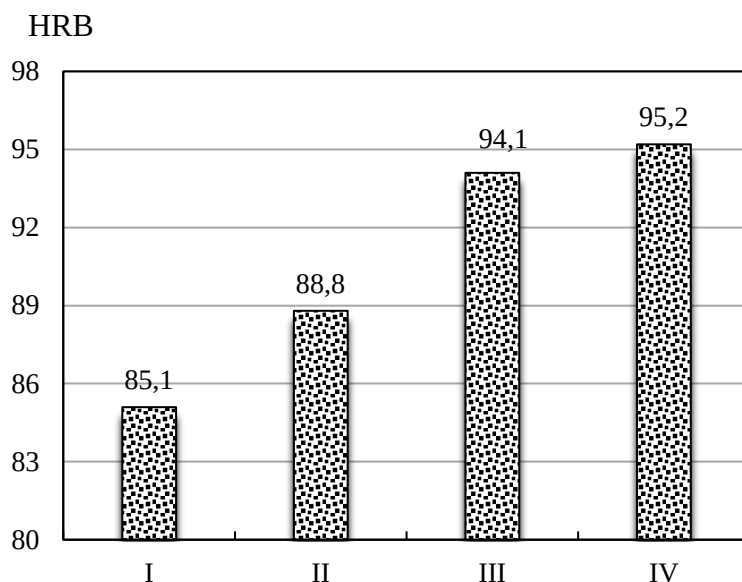


Рис. 5. Поверхностная твердость образцов в зависимости от способов обработки:
I – исходная твердость; II – обкатывание роликом; III – осциллирующее выглаживание;
IV – поперечная обкатка плоскими плитами

Fig. 5. Surface hardness of samples depending on machining methods: I – initial hardness,
II – rolling with a roller, III – oscillating burnishing, IV – transverse rolling with flat plates

**Остаточные напряжения на поверхности деталей
при разных способах деформирующего упрочнения**

Residual stresses on part surface at different methods of deforming hardening

Остаточные напряжения	Обкатывание роликом	Поперечная обкатка плоскими плитами	Осциллирующее выглаживание
σ_φ , МПа	-223	-285	-216
σ_z , МПа	-334	-212	-387



выполнено в 375 точках. Результаты измерения представлены в виде профилограмм поперечных сечений и значений отклонения от круглости.

Отклонение от круглости определяли как максимальную полуразность между наибольшим D_{max} и наименьшим D_{min} диаметрами в каждом из сечений:

$$\Delta_{кр} = \frac{D_{max} - D_{min}}{2}.$$

На рис. 6 показана зависимость отклонения от круглости цилиндрических образцов от способа обработки.

Результаты измерения отклонений от круглости показывают, что после обработки ППД отклонение от круглости снижается в 2–3 раза. Исходное отклонение партии образцов составило 18,5 мкм, что соответствует 10-й степени точности. Осциллирующее выглаживание способствует повышению точности формы упрочненных деталей на 1–2 степени точности. Наименьшее отклонение от круглости цилиндрических деталей получено при поперечной обкатке плоскими плитами в 2,9 раза, а при осциллирующем выглаживании в 2,5 раза.

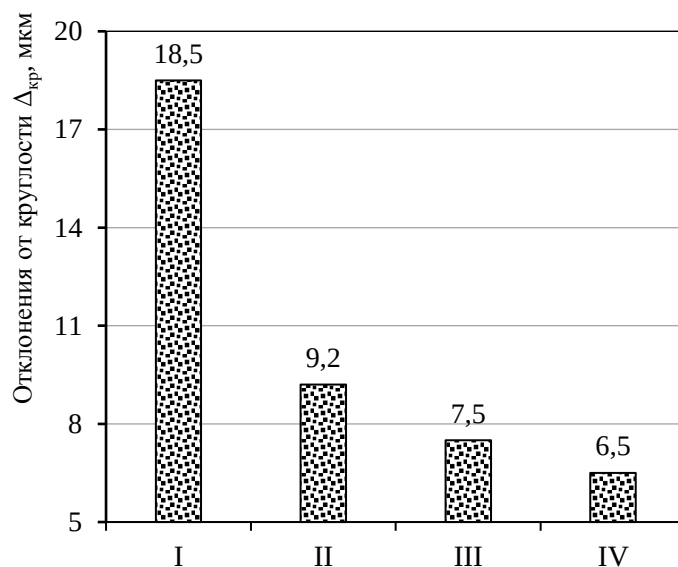


Рис. 6. Отклонения от круглости цилиндрических образцов в зависимости от способов обработки:
I – исходная; II – обкатывание роликом; III – осциллирующее выглаживание;
IV – поперечная обкатка плоскими плитами

Fig. 6. Cylindrical sample deviations from roundness depending on machining methods:
I – initial, II – rolling with a roller, III – oscillating burnishing, IV – transverse rolling with flat plates

Оценка износостойкости деталей, упрочненных разными способами.

При эксплуатации машин их детали контактируют друг с другом или с окружающей средой. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства: износ – и коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др. Важнейшим из них является износостойкость, которая характеризует сопротивление поверхности детали изнашиванию. В процессе изнашивания происходит изменение формы и размеров сопрягаемых деталей, возможны изменения физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, нарушаются условия правильной эксплуатации [16]. Износостойкость является одной из основных характеристик, определяющих долговечность деталей и машин.

Рассмотрим влияние рассматриваемых способов обработки на износостойкость поверхностного слоя упрочненных образцов.

Износостойкость оценивается по абсолютной величине износа по формуле:

$$U = \frac{\Delta D}{2} = \frac{D_0 - D_t}{2},$$



где D_0 – исходный диаметр образцов; D_t – диаметр образцов после изнашивания. Для оценки износостойкости упрочненных валов была сконструирована и изготовлена установка (рис. 7). Установка содержит корпус 1, в котором размещен электродвигатель 2 привода вращения. Вращение от электродвигателя 2 с помощью ременной передачи 3 передается на приводную головку 4 и патрон 5, который предназначен для закрепления образца 6, и сообщения ему вращательного движения. В корпусе также установлен механизм нагружения для прижатия к образцу контртел, представляющих собой две половины (вкладыши) резиновой втулки. Вкладыши с помощью механизма нагружения, состоящего из груза 8 и рычага 7, прижимаются с определенным усилием к рабочей поверхности образца. Испытание образцов проводили в водной среде, которая соответствует реальному условию работы трансмиссионных насосов.

Было исследовано четыре вида образцов для испытания на износ. Образцы первого вида не подвергаются упрочнению. Образцы второго, третьего и четвертого вида получены после обработки ППД.

Скорость вращения образцов – 1250 об/мин. Нагрузка в зоне контакта составляла 150 Н и была обеспечена грузом механизма нагружения. Эксперименты проводили в течение 120 ч. Через заданные промежутки времени (10 часов) образцы снимали с экспериментальной установки и измеряли их диаметры микроиндикаторной головкой с точностью 0,001 мм в трех разных сечениях образца в изношенной зоне. Среднее значение из трех полученных измерений принимали за диаметр образца после изнашивания.

На рис. 8 представлены результаты испытания на износостойкость необработанных и упрочненных заготовок.

Результаты исследования показали, что износостойкость упрочненных образцов

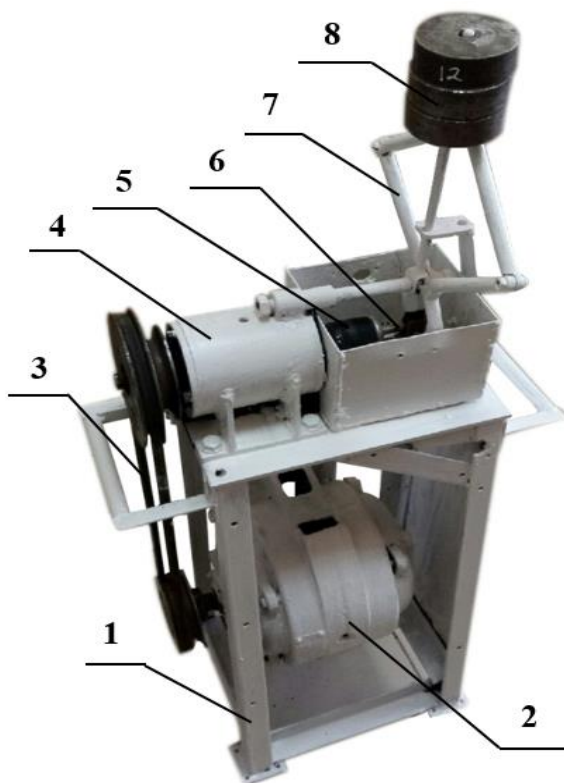


Рис. 7. Установка для исследования износостойкости упрочненных деталей:
1 – корпус; 2 – электродвигатель; 3 – ременная подача; 4 – приводная головка;
5 – патрон, 6 – образец; 7 – рычаг; 8 – груз

Fig. 7. Installation for studying wear resistance of hardened parts: 1 – case; 2 – electric motor;
3 – belt feed; 4 – drive head; 5 – cartridge; 6 – sample; 7 – lever; 8 – load



в несколько раз выше износостойкости образцов без упрочнения. Повышение износостойкости нельзя объяснить только повышенной микротвердостью упрочненных деталей. Существенное значение для повышения износостойкости имеет дисперсность структуры и улучшение микрогеометрии поверхности. Максимальная износостойкость наблюдается у деталей, упрочненных поперечной обкаткой плоскими плитами, а минимальная – у деталей, упрочненных обкатыванием роликом. Износостойкость деталей,

упрочненных осциллирующим выглаживанием, увеличивается почти в 2 раза.

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными других исследований [15, 17–18].

В работе рассмотрено качество поверхностного слоя образцов после упрочнения тремя разными способами. Следует отметить, что при выборе способа упрочнения необходимо учитывать также и геометрию деталей, и вид деформирующего инструмента, и тип технологического оборудования.

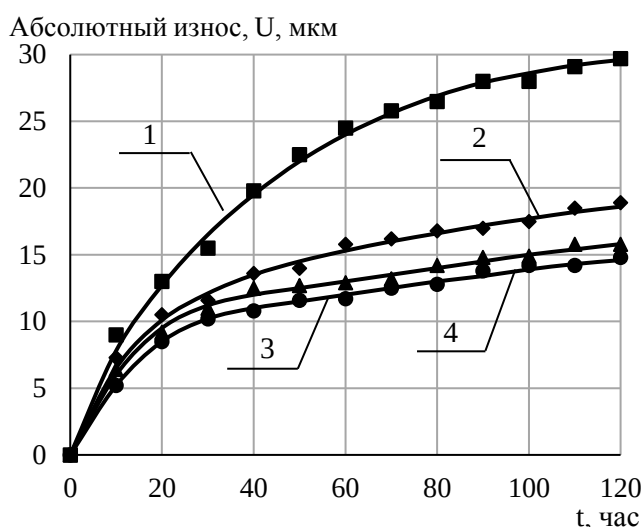


Рис. 8. Абсолютный износ упрочненных образцов в зависимости от способа обработки:

1 – без упрочнения; 2 – упрочнение роликом; 3 – осциллирующее выглаживание;

4 – упрочнение поперечной обкаткой плоскими плитами

Fig. 8. Absolute wear of hardened samples depending on the machining method: 1 – without hardening; 2 – hardened with a roller; 3 – oscillating burnishing; 4 – hardening by transverse rolling with flat plates

Заключение

1. Экспериментальным путем установлено, что шероховатость, полученная при осциллирующем выглаживании, меньше, чем при обкатке роликом, но больше, чем при поперечной обкатке плоскими плитами. Обкатанные поверхности имеют шероховатость в 6–7 раз меньше, чем шероховатость у деталей, упрочненных другими способами.

2. Изменение размеров зерен происходит только в поверхностном слое, центральная область практически не претерпевает пластических деформаций, и зерна не изменяют своих размеров. Область значи-

тельного искажения зерен распространяется на глубину 0,1–0,2 мм при поперечной обкатке плоскими плитами и осциллирующем выглаживании, и на 0,1 мм – при обкатывании роликом.

3. Микротвердость и твердость получена при осциллирующем выглаживании больше, чем при обкатке роликом, но меньше, чем при поперечной обкатке плоскими плитами.

4. Наименьшее отклонение от круглости цилиндрических деталей получено при поперечной обкатке плоскими плитами (2,9 раза), а при обкатке роликом (2,1 раза).



5. При всех трех способах обработки ППД возникают остаточные напряжения сжатия на поверхности образцов. Максимальное осевое остаточное напряжение получено при осциллирующем выглаживании, далее при обкатывании роликом и поперечной обкатке плоскими плитами (в 1,8 раза). Однако наибольшее тангенциальное напряжение формируется при поперечной обкатке плоскими плитами, а минимальное – при осциллирующем выглаживании (в 1,3 раза).

6. Износостойкость упрочненных образцов в несколько раз выше износостойкости образцов без упрочнения. Максимальная износостойкость наблюдается у деталей, упрочненных поперечной обкаткой плоскими плитами, а минимальная – у деталей, упрочненных обкатыванием роликом. Износостойкость деталей, упрочненных осциллирующим выглаживанием, увеличивается почти в 2 раза.

Библиографический список

1. Bobrovskij I.N. Burnishing Systems: a Short Survey of the State-of-the-art ATCES 2017 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 302 012041. 2018.
2. Grigoriev S.N., Bobrovskij N.M., Melnikov P.A. and Bobrovskij I.N. 2017 Research of Tool Durability in Surface Plastic Deformation Processing by Burnishing of Steel Without Metalworking Fluids IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2013. 66 (1). 01.
3. Жасимов М.М. Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании. Алма-Ата: Наука, 1986. 208 с.
4. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.
5. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.
6. Lebedko A.I. Increase in the endurance of textile equipment parts by surface plastic deformation // Metal Science and Heat Treatment. 1982. Т. 24. № 4. С. 295–297.
7. Зайдес С.А., Нго К.К. Поверхностное деформирование в тесненных условиях. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2018. 236 с.
8. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 299 с.
9. Поляк М.С. Технология упрочнения. Техно. методы упрочнения; 2 т. М.: Машиностроение, 1995. Т. 2. 688 с.
10. Чепе П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием. Минск:

Наука и техника, 1981. 128 с.

11. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
12. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь Влияние параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных поверхностей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. № 4. С. 22–29. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-22-29>
13. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Влияние параметров осциллирующего выглаживания на образование регулярного микрорельефа поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 12. С. 62–69.
14. Зайдес С.А., Фам Дак Фюонг. Оценка качества цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитами // Вестник Упрочняющие технологии и покрытия. 2016 № 7. С. 14–18.
15. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981. 288 с.
16. Терещенко А.В. Влияние микрогеометрии поверхности на ее износостойкость – планирование эксперимента // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 48. С. 108–112.
17. Драчев О.И. Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости. ИРБИТ: ОНИКС, 2011. 192 с.
18. Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. Свойства сплавов в экстремальном состоянии. М.: Машиностроение, 2004. 256 с.

References

1. Bobrovskij I.N. Burnishing Systems: A Short Survey of the State-of-the-art ATCES 2017 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 302 012041. 2018.
2. Grigoriev S.N., Bobrovskij N.M., Melnikov P.A. and Bobrovskij I.N. 2017 Research of Tool Durability in Surface Plastic Deformation Processing by Burnishing of Steel Without Metalworking Fluids IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2013. 66 (1). 01.

3. Zhasimov M.M. *Upravlenie kachestvom detalej pri poverhnostnom plasticheskom de-formirovanii* [Quality control of parts at surface plastic deformation]. Alma-Ata: Nauka Publ., 1986, 208 p. (In Russian)
4. Papshev D.D. *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverhnostnym plasticheskim defor-mirovaniem* [Finishing and hardening treatment by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie Publ.,



1987, 152 p. (In Russian)

5. Blyumenshtejn V.Yu., Smelyanskij V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyah obrabotki i ekspluatatsii detalej mashin* [Mechanics of technological inheritance at the stages of machine part processing and operation]. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ., 2007, 400 p. (In Russian)

6. Lebedko A.I. Increase in the endurance of textile equipment parts by surface plastic deformation. *Metal Science and Heat Treatment*, 1982, vol. 24, no. 4, pp. 295–297.

7. Zajdes S.A., Ngo K.K. *Poverhnostnoe deformirovanie v stesnennykh usloviyakh* [Surface deformation under constrained conditions]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2018, 236 p. (In Russian)

8. Smelyanskij V.M. *Mekhanika uprochneniya detalej poverhnostnym plasticheskim defor-mirovaniem* [Mechanics of part hardening by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2002, 299 p. (In Russian)

9. Polyak M.S. *Tekhnologiya uprochneniya. Tekhno. metody uprochneniya* [Hardening technology. Technical methods of hardening]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1995, vol. 2, 688 p. (In Russian)

10. Chepa P.A. *Tekhnologicheskie osnovy uprochneniya detalej poverhnostnym defor-mirovaniem* [Technological bases of part hardening by surface deformation]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1981, 128 p. (In Russian)

11. Odincov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim defor-mirovaniem: spravochnik* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation: reference book]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987, 328 p. (In Russian)

12. Zajdes S.A., Nguen Van Hin' Oscillating burnishing

parameters effect on hardened surface roughness. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, no. 4, pp. 22–29. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-22-29>

13. Zajdes S.A., Nguen Van Hin'. Influence of the oscillation parameters smoothing on formation of regular microrelief of the surface layer. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], 2017, no. 12, pp. 62–69. (In Russian)

14. Zajdes S.A., Fam Dak Fyong. Assessment of the quality of cylindrical parts after transverse burnishing with flat plates. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], 2016, no. 7, pp. 14–18. (In Russian)

15. Sokolov I.A., Ural'skij V.I. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo metalloprodukcii* [Residual stresses and quality of metal products]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1981, 288 p. (In Russian)

16. Tereshchenko A.V. Influence of surface microgeometry on its wear resistance – experiment planning. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2008, no. 48, pp. 108–112. (In Russian)

17. Drachev O.I. *Upravlenie tekhnologicheskoy nasledstvennost'yu detalej maloj zhestkosti* [Control of technological heredity of low rigid parts]. Irbit: ONIKS Publ., 2011, 192 p. (In Russian)

18. Drapkin B.M., Kononenko V.K., Bez'yazychnyj V.F. *Svoystva splavov v ekstremal'nom sostoyanii* [Properties of alloys at extreme condition]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004, 256 p. (In Russian)

Критерии авторства

Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь, Фам Ван Ань сравнили качество поверхностного слоя образцов, обработанных новыми способами упрочнения с традиционной обкаткой роликом. Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Zaides S.A., Nguyen Van Hinh, Pham Van Anh compared the quality of the surface layer of samples treated by the new hardening methods and by traditional rolling. The authors 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зайдес Семен Азикович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов, e-mail: zsa@istu.edu

Нгуен Ван Хинь, аспирант, e-mail: nguyenvanhinhck@gmail.com

Фам Ван Ань, аспирант, e-mail: vananhtdh0202@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Semen A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Engineering Technologies and Materials, e-mail: zsa@istu.edu

Nguyen Van Hinh, Postgraduate student, e-mail: nguyenvanhinhck@gmail.com

Pham Van Anh, Postgraduate student, e-mail: vananhtdh0202@gmail.com



Оригинальная статья / Original article

УДК 66.041; 62-65; 62-97; 67.05

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-41-53>

Оценка энергоэффективности подвесной нагревательной системы электрической печи для тепловой обработки сыпучих материалов

© А.В. Звездин, А.И. Нижегородов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Исследование процессов теплопереноса в рабочем пространстве модулей обжига электрической печи для выявления дополнительных возможностей снижения энергоемкости обжига сыпучих материалов, при новой нагревательной системе. В ходе исследования проводилось моделирование процесса переноса лучистой энергии от нагревательных элементов на термообрабатываемую среду по методу сальдо-потоков. Кроме того, проводился сравнительный анализ новых данных, а также полученных ранее на прежних модификациях нагревательных систем аналогичных печей при обжиге вермикулита. Разработана конструкция новой подвесной нагревательной системы модулей обжига электрических модульно-спусковых печей, обеспечивающая качественное вспучивание вермикулита при сниженной на 22,1% удельной энергоемкости. Расчетным путем определена температура поверхности зерен вспучивающегося вермикулита, получено уравнение связи температур нагревателей и поверхностей зерен при установившемся температурном режиме. Проведенные исследования доказали эффективность новой конструкции подвесной нагревательной системы модулей обжига электрических модульно-спусковых печей. Расчеты показали, что при прочих равных условиях применение подвесной нагревательной системы в модулях печи обеспечивает полноценный обжиг вермикулита при пониженном до 79,3 кВт потреблении электрической мощности.

Ключевые слова: электрическая модульно-спусковая печь, подвесная нагревательная система, теплоперенос, лучистая энергия, удельная энергоемкость обжига, потребляемая мощность, температура нагрева, надежность печи

Информация о статье: Дата поступления 21 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 25 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Звездин А.В., Нижегородов А.И. Оценка энергоэффективности подвесной нагревательной системы электрической печи для тепловой обработки сыпучих материалов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):41–53. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-41-53.

Assessing energy efficiency of electric furnace suspended heating system for bulk material heat treatment

Aleksey V. Zvezdin, Anatoly I. Nizhegorodov

National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The article studies heat transfer processes in the working space of the electric furnace firing modules in order to identify additional opportunities to reduce the energy intensity of bulk material firing when using a new heating system. The study includes the modeling of radiant energy transfer from heating elements to the heat-treated medium using a balance-flow method. In addition, a comparative analysis is given to new data and the data obtained earlier on previous modifications of heating systems of similar furnaces when burning vermiculite. The design of a new suspended heating system of firing modules of electric modular trigger furnaces providing high-quality swelling of vermiculite under the reduced by 22.1% specific energy has been developed. The surface temperature of the intumescent vermiculite granules has been calculated. The equation of heater and grain surface temperature relationship has been obtained at a steady temperature. The conducted researches have proved the efficiency of the new design of the suspended heating system of electric modular trigger furnace firing modules. The calculations showed that under otherwise equal conditions the application of the suspended heating system in the furnace modules provides a complete calcination of the vermiculite under reduced to 79.3 kW consumption of electric power.

Keywords: electric modular trigger furnace, suspended heating system, heat transfer, radiant energy, specific energy consumption of firing, consumed power, heating temperature, furnace reliability

Information about the article: Received December 21, 2018; accepted for publication January 25, 2019; available online February 28, 2019.



For citation: Zvezdin V.A., Nizhegorodov A.I. Assessing energy efficiency of electric furnace suspended heating system for bulk material heat treatment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):41–53. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-41-53.

Введение

Тепловая обработка некоторых минералов, например вермикулита, сунгулит-вермикулитовых конгломератов, перлитового песка и др., может радикально изменить их свойства и получить целевые продукты с новым качеством, имеющие определенное назначение. Так вермикулит вспучивается и становится хорошим тепло- и термоизоляционным материалом [1–5], сунгулит – химически активным реагентом, который используется для детоксикации техногенно загрязненных земель и водных объектов [6, 7]. Эта технология уже отработана и реализуется в электрических модульно-спусковых печах [8].

Но электроэнергия в большинстве регионов страны обходится дорого, это ограничивает широкое применение новых печных агрегатов, поэтому они постоянно совершенствуются.

Первые трехмодульные печи потребляли 102–110 кВт электрической мощности при удельной энергоемкости обжига вермикулита 245–252 кДж/м³, и они уже превосходили огневые печи, работающие на углеводородном топливе [8].

В шестимодульных модификациях печей, с вдвое укороченными модулями, потребляемая мощность была снижена до 112–120 кВт, а удельная энергоемкость – до 230–235 кДж/м³. Анализ коэффициентов полезного действия каждого из модулей обжига показал, что эффективность верхнего, который принимает сырьевой материал из дозатора, характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД), равным 0,215, тогда как у нижнего (из которого выходит вспученный материал) он равен 0,0053 (в сорок раз меньше) [8, 9].

Тогда и возникла концепция модульно-спусковой печи с измененной конструктивной структурой, суть которой – перенос нижнего модуля наверх и установка параллельно с первым верхним модулем. Следующим шагом в развитии концепции было применение «нулевого» не электрифицированного модуля, работающего за счет накопленной в самом материале эксергии (см. рис. 1).

Здесь, на основе анализа процессов теплопереноса в рабочем пространстве модулей демонстрируется возможность дополнительного уменьшения энергоемкости обжига за счет модернизации нагревательной системы печи.

Цель исследования

Целью исследования является изучение влияния процессов теплопереноса в рабочем пространстве модулей электрической печи и выявление дополнительного уменьшения энергоемкости обжига сыпучих материалов за счет модернизации нагревательной системы печи.

На рис. 1 показана трехмодульная электрическая модульно-спусковая печь. Фотография дает полное представление об устройстве печи с прежней конструкцией нагревательной системы, в которой применялись нагреватели их полосового нихрома, установленные на ребро.

Модули обжига – это энергетические блоки печи, в которых происходит тепловая обработка сыпучего материала. На начальном этапе развития данной концепции конструкция модуля предусматривала горизонтальное положение полосовых нихромовых нагревателей – плашмя. Такая нагревательная система оказалось наиболее эффективной с точки зрения отдачи тепловой энергии в сыпучей среде: при правильном подборе параметров нагревателей достигалась максимальная суммарная площадь покрытия поверхности модуля – около 40%.

Но из-за образования нагара, локального перегрева нагревателей и плавления нихрома происходили частые отказы печи [10], поэтому второй вариант установки нагревателей вертикальный – на ребро – оказался более надежным и просуществовал до недавнего времени.



Рис. 1. Электрическая модульно-спусковая печь: 1 – дозатор сырья, 2 – лоток, 3 – модуль обжига, 4 – воздуховод, 5 – крепления электронагревателей, 6 – корпус печи, 7 – дополнительный неэлектрический модуль

Fig. 1. Electric modular trigger furnace: 1 – batcher of raw materials, 2 – tray, 3 – firing module, 4 – air duct, 5 – electric heater fixation, 6 – furnace body, 7 – additional non-electric module

Опыт эксплуатации таких печей на двух предприятиях г. Иркутска проявил недостатки и этой системы. Полосовые нагреватели образуют продольные камеры, в которых материал контактирует с нихромом, что постепенно приводит к нагару на его стенках, перегреву и плавлению. В местах пересыпания с одного модуля на другой возникает скученность материала, он перекрывает нагреватели по высоте, что так же приводит к плавлению нихрома [10]. Камерность создает заторы в местах сужения соседних полос, постепенно по длине камер образуются «пробки» из частиц материала, приводящие к тем же последствиям. И хотя второй вариант понизил число отказов, новая подвесная нагревательная система, в которой нагреватели находятся над потоком сыпучего материала, практически устраняет возможность контакта с ним.

И еще один недостаток: нагреватели занимают до 4% поверхности модуля, что уменьшает производительность печи из-за стеснения потока сыпучего материала в камерах.

На рис. 2 показана схема модуля обжига с проволочными нагревателями, число которых n определяет его ширину B , а она задается необходимой производительностью печи:

Исследование нагревательной системы методом сальдо-потоков

Для дальнейшего анализа сделаем следующие допущения:

- потери мощности в силовых кабелях и электроаппаратах не учитываем, так как они не являются составными частями печи;
- модули обжига создают симметричную нагрузку на сеть, поэтому потерь мощности из-за перекоса фаз нет;
- активное сопротивление проволочного нагревателя из нихрома [9], почти в тысячу раз больше индуктивного [10], поэтому индуктивным сопротивлением пренебрегаем;
- по этой же причине пренебрегаем влиянием электромагнитного поля нагревателя на образования индуктивного сопротивления соседних нагревателей;



– при температуре 827°C и ниже доля лучистой энергии нагревателей в видимой части спектра с длиной волны $\lambda = 0,4 \dots 0,76$ мкм составляет 0,04% [11], поэтому потерями лучистой энергии пренебрегаем;

– нагрузку на сеть, создаваемую печью, можно считать активной (I – сила тока, А, U – линейное напряжение, В). Тогда вся потребляемая мощность с ошибкой не более 1 % преобразуется в тепловое излучение, Вт:

$$3 I \cdot U \approx N_Q;$$

– скин-эффект, приводящий к распределению переменного тока, преимущественно в поверхностном слое проводника, и к увеличению активного сопротивления, не нарушает примерный баланс электрической и тепловой мощности.

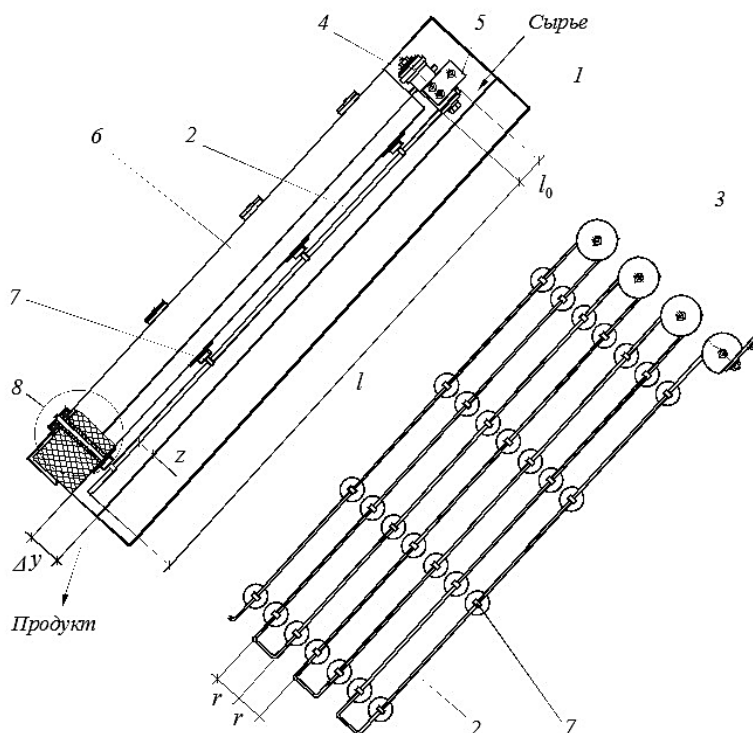


Рис. 2. Конструктивная схема модуля обжига: модуль содержит огнеупорное основание (1), проволочные нагреватели (2), закрепленные на головках (3) с электроизолирующими шайбами (4) и шинами (5); нагреватели удерживаются на термодержке (6) хомутами (7) из полосового никрома и комплектом спецдеталей (8)

Fig. 2. Design scheme of the firing module: the module contains a refractory base (1), wire heaters (2) fixed to the heads (3) with electrical insulating beads (4) and buses (5); heaters are fixed to the thermal cover (6) with clamps (7) made of strip nichrome and a set of special parts (8)

Рассмотрим схему на рис. 3. Это стационарная система, образованная изотермическими поверхностями нагревателей 1 и 2, основания 3 термодержки 4 с изоляционным слоем из муллитокремнезема (d – диаметр нагревателей, a и z – соответствующие зазоры, Δy – высота пространства обжига). Система дополнена виртуальными поверхностями 5 и 6, замыкающими пространство, заполненное диатермической средой [11].

Поверхности 1, 2, 3 и 4 являются не прозрачными, диффузными, поэтому их излучательная способность ε равна поглотительной α (ρ – отражательная способность):

$$\alpha = \varepsilon = 1 - \rho.$$

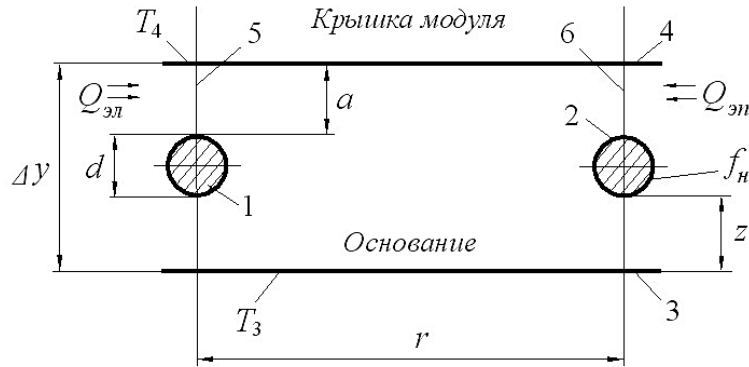


Рис. 3. Схема к моделированию теплопереноса в условной рабочей камере
Fig. 3. Diagram for heat transfer modeling in a conditional working chamber

Виртуальные поверхности 5 и 6 прозрачны, поэтому: $\alpha = 0$, $\rho = 0$. Все поверхности не поглощают и не отражают собственное излучение. Потоки падающих и эффективных излучений определяются суммами [11], Вт:

$$Q_{ni} = \sum_{k=1}^j Q_{\varepsilon k} \varphi_{ki}, \quad (1)$$

$$Q_{\varepsilon i} = \rho_i \sum_{k=1}^j Q_{\varepsilon k} \varphi_{ki} + Q_{ci}, \quad (2)$$

где ρ_i – отражательная способность i -й поверхности, φ_{ki} – средний угловой коэффициент излучения, учитывающий долю эффективного излучения других поверхностей, достигающего данную, $Q_{\varepsilon k}$ – эффективный поток с поверхности k , падающий на поверхность i , Q_{ci} – поток собственного излучения.

Алгоритм моделирования переноса лучистой энергии основан на методе сальдо-потоков [11] и для второго варианта установки нагревателей разработан в работе [9], но особенности навесной нагревательной системы создают специфику новой задачи.

Сначала, по правилу «натянутых нитей» [11] определим угловые коэффициенты φ_{ki} соответствующих потоков, исходя из геометрических размеров условной рабочей камеры, показанной на рис. 3:

$$\varphi_{12} = \varphi_{21} = \frac{2}{\pi d} \left(\sqrt{d^2 + r^2} - r \right), \quad \varphi_{14} = \frac{1}{\pi d} \left(\sqrt{a^2 + r^2} + d - \sqrt{(a+d)^2 + r^2} \right),$$

$$\varphi_{34} = \frac{1}{r} \left(\sqrt{r^2 + \Delta y^2} - \Delta y \right), \quad \varphi_{13} = \frac{1}{\pi d} \left(\sqrt{z^2 + r^2} + d - \sqrt{(z+d)^2 + r^2} \right).$$

Дополнительные равенства из алгебры лучистых потоков [6]:

$$\varphi_{13} = \varphi_{31} = \varphi_{23} = \varphi_{32}, \quad \varphi_{14} = \varphi_{41} = \varphi_{24} = \varphi_{42}, \quad \varphi_{34} = \varphi_{43}, \quad \varphi_{31} = \varphi_{32}, \quad \varphi_{41} = \varphi_{42}.$$

После преобразований выражений (1, 2) получаем систему уравнений:

$$Q_{\varepsilon 1} = Q_{\varepsilon 2} = Q_{c1} + \rho_1 Q_{n1} = Q_{c1} + \rho_1 Q_{\varepsilon 2} \varphi_{21} + \rho_1 Q_{\varepsilon 3} \varphi_{31} + \rho_1 Q_{\varepsilon 4} \varphi_{41}, \quad (3)$$



$$Q_{\vartheta 3} = \rho_3 Q_{n3} = \rho_3 Q_{\vartheta 1} \varphi_{13} + \rho_3 Q_{\vartheta 2} \varphi_{23} + \rho_3 Q_{\vartheta 4} \varphi_{43},$$

$$Q_{\vartheta 4} = \rho_4 Q_{n4} = \rho_4 Q_{\vartheta 1} \varphi_{14} + \rho_4 Q_{\vartheta 2} \varphi_{24} + \rho_4 Q_{\vartheta 3} \varphi_{34}.$$

Если принять условную рабочую камеру на рис. 3 за центр симметрии модуля, то входящие слева и справа (а равно и выходящие) эффективные потоки Q_{ϑ} теплового излучения равны:

$$Q_{\vartheta 5} = Q_{\vartheta 6}. \quad (4)$$

Равенство (4) отражает тепловое равновесие между центральной и другими камерами. Уравнение (3) запишем без учета отраженного излучения:

$$Q_{\vartheta 1} = Q_{\vartheta 2} \approx Q_{c1} \approx Q_{c2} = \varepsilon_n \sigma T_n^4 f_n = Q_{\vartheta}, \quad (5)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана³, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴, T_n – температура нагревателей (°К), f_n – площадь поверхности всех нагревательных элементов печи (м²).

Равенство (5) упрощает исследование, почти не влияя на точность, так как степень черноты нихрома $\varepsilon_n \approx 0,96$, а его отражательная способность ρ_n составляет всего 0,04 [12].

Для шамота (основание модуля) и муллитокремнеземистого войлока (термокрышка) отражательные способности $\rho_{ш}$ (ρ_3) и ρ_m (ρ_4) равны, соответственно, 0,35 и 0,65 [12].

Учитывая выражение (5) и производя соответствующие преобразования, получим зависимости для эффективных потоков с поверхностями 1, 2, 3 и 4:

$$Q_{\vartheta} = \varepsilon_n \sigma T_n^4 f_n (1 + \rho_n \varphi_{12}). \quad (6)$$

$$Q_{\vartheta 3} = \frac{2\rho_{ш} \varepsilon_n \sigma T_n^4 f_n (1 + \rho_n \varphi_{12})(\varphi_{13} + \varphi_{34} \varphi_{14} \rho_{ш})}{1 - \rho_{ш}^2 \varphi_{34}^2}, \quad (7)$$

$$Q_{\vartheta 4} = \frac{2\rho_m \varepsilon_n \sigma T_n^4 f_n (1 + \rho_n \varphi_{12})(\varphi_{14} + \varphi_{34} \varphi_{13} \rho_m)}{1 - \rho_m^2 \varphi_{34}^2}. \quad (8)$$

Формулы (6)–(8) не учитывают влияния нагревателей соседних камер 1, 2 и 3 на нулевую (центральную) камеру, поэтому найдем угловые коэффициенты для нагревателей С, В и А к поверхностям основания и термокрышки на участке рассматриваемой нулевой камеры, рис. 4.

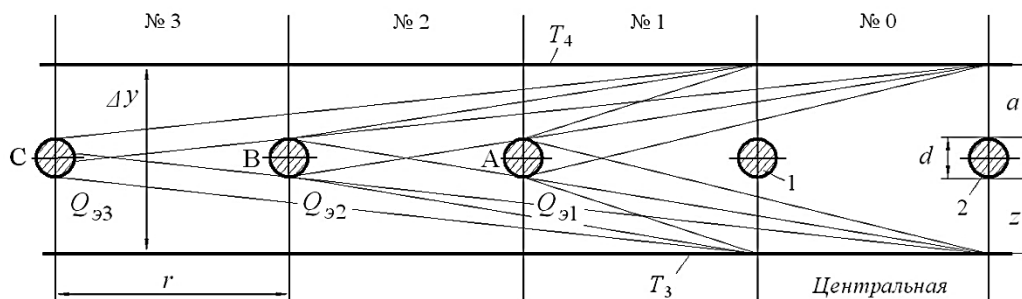


Рис. 4. Схема к расчету угловых коэффициентов для потоков эффективного излучения в нулевую (центральную) камеру от нагревателей А, В и С соседних камер
Fig. 4. Diagram for calculating angular coefficients for effective radiation flows into the zero (central) chamber from the heaters A, B and C of the adjacent cells



В отличие от второго варианта установки полосовых нагревателей, при котором на основания рабочих камер падали лишь отраженные от термокрышки потоки (их доля не превышала 4,8 %) [9], здесь на поверхность основания падет еще и собственное излучение соседних нагревателей. Пользуясь схемой на рис. 4, запишем выражения:

$$\varphi_{A3} = \frac{1}{\pi d} \left[\sqrt{r^2 + (z+d)^2} + \sqrt{4r^2 + z^2} - \sqrt{4r^2 + (z+d)^2} - \sqrt{r^2 + z^2} \right].$$

$$\varphi_{B3} = \frac{1}{\pi d} \left[\sqrt{4r^2 + (z+d)^2} + \sqrt{9r^2 + z^2} - \sqrt{9r^2 + (z+d)^2} - \sqrt{4r^2 + z^2} \right].$$

$$\varphi_{C3} = \frac{1}{\pi d} \left[\sqrt{(3r-0,5d)^2 + (z+d)^2} + \sqrt{16r^2 + z^2} - \sqrt{(4r-0,5d)^2 + (z+d)^2} - \sqrt{9r^2 + z^2} \right].$$

Формулы для коэффициентов φ_{A4} , φ_{B4} , и φ_{C4} аналогичны, но вместо z будет зазор a (см. рис. 2).

С учетом влияния нагревателей соседних камер, выражения для падающих Q'_n и эффективных Q'_o потоков для поверхностей¹ и 4 теперь примут вид:

$$Q'_{n3} = 2Q_3\varphi_{13} + Q_{34}\varphi_{43} + 2Q_{3C}\varphi_{C3} + 2Q_{3B}\varphi_{B3} + 2Q_{3A}\varphi_{A3}, \quad (9)$$

$$Q'_{n4} = 2Q_3\varphi_{14} + Q_{33}\varphi_{34} + 2Q_{3C}\varphi_{C4} + 2Q_{3B}\varphi_{B4} + 2Q_{3A}\varphi_{A4}, \quad (10)$$

$$Q'_{33} = 2\rho_3 Q_3\varphi_{13} + \rho_3 Q_{34}\varphi_{43} + 2\rho_3 Q_{3C}\varphi_{C3} + 2\rho_3 Q_{3B}\varphi_{B3} + 2\rho_3 Q_{3A}\varphi_{A3}, \quad (11)$$

$$Q'_{34} = 2\rho_4 Q_3\varphi_{14} + \rho_4 Q_{33}\varphi_{34} + 2\rho_4 Q_{3C}\varphi_{C4} + 2\rho_4 Q_{3B}\varphi_{B4} + 2\rho_4 Q_{3A}\varphi_{A4}, \quad (12)$$

где Q_{3C} , Q_{3B} и Q_{3A} – эффективные потоки с поверхности нагревателей третьей, второй и первой условных рабочих камер, достигающие поверхности 3 и 4 в центральной камере (рис. 4).

После преобразований выражений (9)–(12) получим формулы для расчета результирующих Q_p -потоков с поверхностей 3 и 4 и поверхностей нагревателей Q_p :

$$Q_{p3} = (1 - \rho_{ш}) (2Q_3\varphi_{13} + Q_{34}\varphi_{43} + 2Q_{3C}\varphi_{C3} + 2Q_{3B}\varphi_{B3} + 2Q_{3A}\varphi_{A3}),$$

$$Q_{p4} = (1 - \rho_{ш}) (2Q_3\varphi_{14} + Q_{33}\varphi_{34} + 2Q_{3C}\varphi_{C4} + 2Q_{3B}\varphi_{B4} + 2Q_{3A}\varphi_{A4}).$$

$$Q_p = \varepsilon_n \sigma T_n^4 f_n (1 + \rho_n \varphi_{12}) (\varphi_{12} - 1) \varphi_{12} + Q_{33}\varphi_{31} + Q_{34}\varphi_{41}.$$

Далее определяем температуры оснований T_3 и крышек T_4 во всех центральных условных камерах модулей (к ним не относятся шесть крайних камер, находящихся у левой и правой стенок модулей) и температуру самих нагревателей T_H :

¹Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. М.: Изд-во физико-математической литературы, 1972. 256 с. / Handbook of elementary physics / N.I. Koshkin, M.G. Shirkevich. M.: Physical and Mathematical Literature Publ., 1972, 256p.



$$T_n = \left\{ \frac{1}{\sigma f_n} \cdot \left[Q_o - Q_p \left(\frac{1 - \varepsilon_n}{\varepsilon_n} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{4}}. \quad (13)$$

$$T_3 = \left\{ \frac{1}{\sigma f_3} \cdot \left[Q'_{o3} - Q_{p3} \left(\frac{1 - \varepsilon_{ш}}{\varepsilon_{ш}} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{4}}, \quad (14)$$

$$T_4 = \left\{ \frac{1}{\sigma f_4} \cdot \left[Q'_{o4} - Q_{p4} \left(\frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{4}}, \quad (15)$$

где $\varepsilon_{ш} = 0,65$ и $\varepsilon_m = 0,35$ – степени черноты поверхностей основания (шамот) и термокрышки (муллитокремнеземистый войлок) [12], $f_o = f_k$ – суммарные площади основания и термокрышки модуля $2,71 \text{ м}^2$.

Для оценки энергоэффективности подвесной нагревательной системы следует сравнить температуры поверхностей условных центральных камер с соответствующими температурами в прежней нагревательной системе. В работе [9] проведены следующие их значения: нагревателей – $T_n = 1042,3 \text{ }^\circ\text{K}$, основания – $812,7 \text{ }^\circ\text{K}$, термокрышки – $841,1 \text{ }^\circ\text{K}$.

Рассчитаем новые значения T_n , T_3 и T_4 . С учетом угловых коэффициентов $\varphi_{12} = 0,032$, $\varphi_{31} = 0,27$, $\varphi_{41} = 0,17$, $\varphi_{34} = 0,52$, площади поверхности всех нагревателей $f_n = 0,966 \text{ м}^2$ и параметров сети $I = 155 \text{ A}$ и $U = 220 \text{ В}$ находим соответствующие эффективные и результирующие потоки и температуру поверхности нагревателей по формуле (13) – $T_n = 1120,5 \text{ }^\circ\text{K}$. Сравнение данных из работы [9] к полученным значением показывает, что при одинаковой потребляемой мощности ($3 \cdot 155 \cdot 220 = 102300 \text{ Вт}$) температура T_n возрастает на $7,5 \%$. Однако нагрев поверхностей пространства обжига изменяется иначе. По формуле (14) с учетом коэффициентов $\varphi_{A3} = 0,024$, $\varphi_{B3} = 0,0077$ и $\varphi_{C3} = 0,0031$ находим температуру основания модуля – $693,8 \text{ }^\circ\text{K}$, что на $14,6 \%$ меньше. Снижение температуры объясняется наличием зазора z , которого нет в прежней нагревательной системе. Далее, по формуле (15) рассчитываем температуру поверхности термокрышки – $673,8 \text{ }^\circ\text{K}$, а это меньше на $19,9\%$ и это объясняется большей отражательной способностью муллитокремнеземистого войлока.

Снижение температур на поверхностях пространства обжига не является отрицательным результатом. В работе [13] доказано, что более 90% поглощаемой вермикулитом тепловой мощности несут лучистые потоки нагревателей. Следовательно, эффект снижения будет приводить лишь к положительному результату – уменьшению тепловых потерь через кондукцию в термокрышке и основании.

Результаты исследований

Теперь нужно установить мощность нагревателей, достаточную для полноценного обжига материала. Наблюдение за движением вспучивающегося вермикулита показывает, что из-за неровностей поверхности его зерна находятся в состоянии постоянного подпрыгивания, поэтому на схеме к расчету температуры поверхности зерна, рис. 5, оно показано в положении напротив проволочного нагревателя.

Рассмотрим изменение температуры на поверхности зерна в зависимости от его положения x относительно нагревателя. С учетом уравнения баланса плотности мощности потока излучения e_s для печи в целом и подводимой удельной мощности, Вт/м^2 :

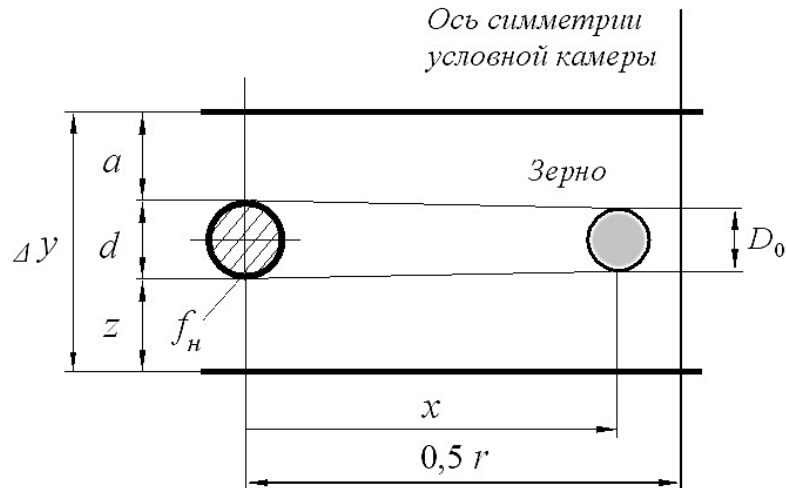


Рис. 5. Схема к расчету температуры на поверхности зерна
Fig. 5. Diagram for calculating grain surface temperature

$$3\frac{I \cdot U}{f_h} = e_s = \sigma T_h^4, \quad (16)$$

формулы для расчета температуры будут иметь вид:

– первый случай – для зерна, расположенного на оси симметрии условной рабочей камеры, рис. 5, при $x = 0,5r$:

$$T_{31} = \left[\alpha_{\epsilon} \cdot \frac{6I \cdot U \epsilon_{\epsilon}}{\sigma f_{\epsilon}} (1 + \rho_{\epsilon} \varphi_{12}) \cdot \varphi'_{12} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (17)$$

– второй случай – для зерна, находящегося в соприкосновении с поверхностью первого нагревателя, рис. 5, при $x = 0,5d + 0,5D_0$:

$$T_{32} = \left[\alpha_{\epsilon} \cdot \frac{6I \cdot U \epsilon_h}{\sigma f_{\epsilon}} (1 + \rho_h \varphi_{12}) \cdot \frac{\varphi'_{12} + \varphi''_{12}}{2} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (18)$$

Здесь α_6 – поглощательная способность вермикулита ($\alpha_6 = 0,768$ [14]), φ'_{12} – это угловой коэффициент от поверхностей нагревателей слева и справа до поверхности зерна, рис. 5, а цифра 6 в формулах (17) и (18) учитывает, что зерно получает энергию и от второго нагревателя (на рис. 5 не показан).

Формулы для расчета угловых коэффициентов потоков с обеих излучающих поверхностей нагревателей:

– первый случай:

$$\varphi'_{12} = \frac{1}{2\pi d} \left[2\sqrt{d^2 + x^2} \right] - 2x = \frac{2}{\pi d} \left[\sqrt{d^2 + \frac{r^2}{4}} - \frac{r}{2} \right], \quad (19)$$

– второй случай:



$$\varphi'_{12} = \frac{1}{d} \left[\sqrt{d^2 + \left(\frac{1}{2}d + \frac{1}{2}D_0 \right)^2} \right] - \left(\frac{1}{2}d + \frac{1}{2}D_0 \right), \quad (20)$$

где πd – периметр окружности нагревателя.

Подставляя в формулу (19 и 20) численные значения параметров $d = 5,05$ мм и $r = 32,0$ мм, получим значения угловых коэффициентов:

– при $x = 0,5r$ – $\varphi'_{12} = 0,064$ (при этом отклонение зерна вверх – вниз до контакта с поверхностями изменяет значение φ'_{12} на 2,2%, чем можно пренебречь);

– при $x = 0,5d + 0,5D_0$ с учетом того, что нагреватель и зерно находятся в непосредственной близости, а поверхность нагревателя обладает свойством диффузности [10] – $\varphi'_{12} = 0,42$ (причем это значение будет иметь место и в случае, когда зерно располагается под нагревателем).

Суммарную площадь поверхности f_s для виртуального вермикулитового зерна длиной, равной рабочей длине огнеупорной поверхности всех модулей, определим по выражению:

$$f_s = 3\pi d \cdot (2n_n + 1) \cdot l,$$

где $(2n_n + 1)$ – число виртуальных зерен во всех условных камерах: при $n_n = 10$, $(2n_n + 1) = 21$; l – длина рабочего участка поверхности модуля (0,92 м). При этом площадь f_s равна 0,92 м².

Так как нахождение движущихся зерен вблизи нагревателей вдвое более вероятно, чем в центре условной рабочей камеры, то более общей является формула (18), которая с учетом приведенного углового коэффициента $(2\varphi'_{12} + \varphi''_{12})/3$, примет вид:

$$T_z = \left[\alpha_c \cdot \frac{6I \cdot U \varepsilon_n}{\sigma f_s} (1 + \rho_n \varphi_{12}) \cdot \frac{2\varphi'_{12} + \varphi''_{12}}{3} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (21)$$

По ней расчет температуры дает следующее значение: $T_z = 847,1$ °К.

Возведем в четвертую степень обе части уравнения (21) и получим:

$$T_z^4 \sigma f_s = \alpha_c \cdot 6I \cdot U \varepsilon_n \cdot (1 + \rho_n \varphi_{12}) \cdot \frac{2\varphi'_{12} + \varphi''_{12}}{3}. \quad (22)$$

Его левая часть представляет собой поглощенную всеми зернами вермикулитового потока мощность $Q_{\text{пог}}$ за время обжига. Тогда уравнение (22) можно записать в виде:

$$Q_{\text{пог}} = \alpha_c \cdot 6I \cdot U k_f \varepsilon_n \cdot (1 + \rho_n \varphi_{12}) \cdot \frac{2\varphi'_{12M} + \varphi''_{12M}}{3}. \quad (23)$$

Произведя преобразования, получим уравнение связи температур нагревателей и поверхностей зерен в установившемся температурном режиме:

$$T_n = T_z \left[\alpha_c \frac{2 \cdot f_n}{3 \cdot f_s} \varepsilon_n \cdot (1 + \rho_n \varphi_{12}) \cdot (2\varphi'_{12} + \varphi''_{12}) \right]^{-1}. \quad (24)$$

В работе [13] экспериментально доказано, что полноценное вспучивание вермикулита



со средним условным диаметром зерен 4–5 мм за время $\sim 3\text{--}3,2$ с, происходит при температуре нагрева зерен $785,0^\circ\text{K}$, что в подвесной нагревательной системе будет соответствовать температуре нагревателей $T_n = 1001,3^\circ\text{K}$ (24). Тогда новая нагревательная система обеспечит полноценный обжиг при меньшей потребляемой мощности N_{nc} , которую можно рассчитать, используя выражение (16), сохранив некоторый запас по температуре ($1,05$ – коэффициент запаса температуры):

$$N_{nc} = N \cdot \left(\frac{1,1 \cdot T_{n1}}{T_n} \right)^4 = 102300 \cdot \left(\frac{1,05 \cdot 1001,3}{1120,5} \right)^4 = 79303 \text{ Вт},$$

где N – потребляемая мощность прежней нагревательной системы (102300 Вт) [9].

Полученный результат показывает, что применение подвесной нагревательной системы в модулях обжига электрических модульно-спусковых печей обеспечит полноценный обжиг сыпучего материала (в данном случае – вермикулита) при потребляемой мощности 79,3 кВт, что на 22,1% меньше, чем в печах с прежней нагревательной системой при прочих равных условиях.

При одинаковой производительности удельная энергоемкость обжига вермикулита снизилась бы тоже на 22,1% до $179\text{--}183$ МДж/м³. Но производительность печи за счет устранения камерности (подвесная система) возрастет при неизменной ширине модулей на 4%. Поэтому будет достигнуто дополнительное снижение энергоемкости до $172\text{--}176$ МДж/м³ (в среднем на 25,1%).

Заключение

Моделирование процессов переноса лучистой энергии внутри условных рабочих камер на их ограничительные поверхности и на термообрабатываемую сыпучую среду в новой конструктивной конфигурации подвесной нагревательной системы показало следующее. При одинаковой потребляемой мощности (102,3 кВт) температура проволочных нагревателей по сравнению с прежней (камерной) нагревательной системой возрастает на 7,5%. И в тех случаях, когда требуется более высокая температура обработки тех или иных сыпучих материалов, такой температурный режим может быть обеспечен. А при обжиге вермикулита в частности возможно снижение потребляемой электрической мощности на 22,1%, при этом печь с подвесной нагревательной системой обеспечит его полноценное вспучивание. При одинаковой производительности будет обеспечено снижение и удельной энергоемкости обжига до $172\text{--}176$ МДж/м³, что повышает конкурентоспособность электрических печных агрегатов по сравнению с шахтными или горизонтальными трубчатыми печами, работающими на углеводородном топливе.

Снижение энергоемкости будет обеспечено и при термообработке других материалов, но в каждом конкретном случае оно будет иметь свои значения. Кроме того, разработанная нагревательная система с нагревателями круглого сечения, будучи размещенной над огнеупорной поверхностью модулей обжига с зазором, практически исключает контакт с обрабатываемым материалом и, следовательно, – отказы печей, значительно повышая их надежность.

Однако, как было сказано выше, дополнительное повышение энергоэффективности электрических модульно-спусковых печей может быть достигнуто за счет изменения конструктивной структуры, о чем речь пойдет в следующей статье.

Библиографический список

1. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 125. P. 53–62.
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 Işçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants // *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 146. P. 7–13.
6. Кременецкая И.П., Беляевский А.Т. Аморфизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2010. № 18. С. 41–49.
7. Кременецкая И.П., Корытная О.П., Васильева Т.Н. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентиносодержащих вскрышных пород // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2008. № 4. С. 33–40.
8. Нижегородов А.И. Опыт эксплуатации электрических модульно-спусковых печей различных модификаций для обжига вермикулитовых концентратов // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2014. № 9. С. 27–34.
9. Нижегородов А.И., Звездин А.В. Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 250 с.
10. Нижегородов А.И. Факторы надежности энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулита // *Строительные и дорожные машины*. 2015. № 5. С. 13–18.
11. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос. М.: Академкнига, 2002. 455 с.
12. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
13. Нижегородов А.И., Звездин А.В., Брянских Т.Б. Уточненная модель теплоусвоения вермикулита при обжиге в электрических печах с учетом новых экспериментальных данных // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 96–99.
14. Zvezdin A.V., Bryanskikh T.G. Nizhegorodov A.I. Analytical model of absorption reflection properties of vermiculite under thermal / *Refractories and industrial ceramics*. 2017. Vol. 57. No. 1.

References

1. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 125, pp. 53–62.
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 Işçi. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 146, pp. 7–13.
6. Kremeneckaya I.P., Belyaevskij A.T. Amorphization of serpentine minerals in the production technology of magnesia-silicate reagent for heavy metal immobilization. *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 2010, no. 18, pp. 41–49. (In Russian)
7. Kremeneckaya I.P., Korytnaya O.P., Vasil'eva T.N. Immobilization reagent for heavy metals from serpentine-containing overburden rocks. *Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie* [Water Purification. Water Treatment. Water Supply], 2008, no. 4, pp. 33–40. (In Russian)
8. Nizhegorodov A.I. Experience of operating electrical ovens of different modifications equipped with releasing units and intended for burning vermiculite concentrates. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics], 2014, no. 9, pp. 27–34. (In Russian)
9. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V. *Energotekhnologicheskie agregaty dlya pererabotki vermikulitovykh koncentratov* [Energy technological plants for vermiculite concentrate processing]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2015, 250 p. (In Russian)
10. Nizhegorodov A.I. Reliability factors of energy technological units for vermiculite firing. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and Road Building Machinery], 2015, no. 5, pp. 13–18. (In Russian)
11. Tegin A.S., Shvydkij V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassopereenos* [Heat and Mass Transfer]. Moscow: Akademkniga Publ., 2002, 455 p. (In Russian)
12. Kutateladze S.S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie* [Heat transfer and hydrodynamic resistance]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, 367 p. (In Russian)
13. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V., Bryanskikh T.B. Refined model of vermiculite heat absorption at firing in electric furnaces with account of new experimental data. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials], 2017, no. 3, pp. 96–99. (In Russian)
14. Zvezdin A.V., Bryanskikh T.G. Nizhegorodov A.I. Analytical model of absorption reflection properties of vermiculite under thermal. *Refractories and industrial ceramics*, 2017, vol. 57, no. 1.



Критерии авторства

Звездин А.В., Нижегородов А.И. исследовали процессы теплопереноса в рабочем пространстве модулей обжига электрической печи. Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Zvezdin, A.V., Nizhegorodov A.I. have studied the processes of heat transfer in the working space of electric furnace firing modules. The authors 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Звездин Алексей Владиславович, соискатель, e-mail: alexzvez@gmail.com

Нижегородов Анатолий Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, e-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey V. Zvezdin, external PhD student, e-mail: alexzvez@gmail.com

Anatoly I. Nizhegorodov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Hydraulic Systems, e-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9.048.6.04

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-54-62>

Коррекция частоты вращения шпинделя при фрезеровании по данным численного моделирования системы: приспособление-инструмент-заготовка

© П.Н. Костин, А.В. Лукьянов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: При механической обработке неизбежно возникают колебания, которые при совпадении с собственными частотами одного из элементов, образующих эту систему, могут вызвать резонанс, вызывающий преждевременный износ дорогостоящего оборудования, инструмента и оснастки, что снижает качественные характеристики деталей или может привести к браку. Поэтому ставится вопрос о контроле собственных частот колебаний элементов станочной системы, инструмента и заготовки. На основе конечно-элементной модели колебаний системы: станок-приспособление-инструмент-заготовка разработаны рекомендации по выбору нерезонансных частот вращения шпинделя фрезерного станка. Исследования проводились экспериментальными, аналитическими и методами конечно-элементного моделирования с использованием автоматизированной инженерной системы расчетов Femap. При проведении экспериментов использовано измерительное оборудование фирмы Polytec и пакет программного обеспечения National Instruments LabVIEW, модуль Sound and Vibration. Получены конечно-элементные модели колебаний системы приспособление-инструмент-заготовка, на основании которых выданы рекомендации по назначению допустимых частот вращения шпинделя. Подход может быть применен для корректировки режимов резания при фрезеровании, например, корпусных деталей, панелей, имеющих значительные отличия между геометрической формой и массой заготовки в сравнении с готовой деталью.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование фрезерования, моделирование колебаний при фрезеровании, виброиспытания инструментальной наладки, оптимальные режимы фрезерования

Информация о статье: Дата поступления 03 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 10 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Костин П.Н., Лукьянов А.В. Коррекция частоты вращения шпинделя при фрезеровании по данным численного моделирования системы: приспособление-инструмент-заготовка. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):54–62. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-54-62.

Spindle rotation speed adjustment when milling by system numerical modeling data: device-tool-workpiece

Pavel N. Kostin, Anatoly V. Lukyanov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: Machining operations are unavoidably accompanied with oscillations, which, in case of their coincidence with the natural oscillations of one of the elements of the system, can cause a resonance. The latter results in the premature failure of expensive equipment, tools and tool attachment, reduces the quality characteristics of the finished product as well as leads to rejects. Therefore, the question is raised on controlling the natural oscillation frequencies of the elements of the machine-tool system, a tool and a workpiece. Based on the finite element model of the machine-tool-device-tool-workpiece system oscillations the recommendations for choosing non-resonant rotational speeds of the milling machine spindle have been developed. The studies employed experimental, analytical, and finite element modeling methods with the use of Femap automated engineering calculation system. The experiments were carried out using Polytec measuring equipment, National Instruments LabVIEW software package, Sound and Vibration module. We have obtained the finite-element models of the device-tool-workpiece system oscillations, on the basis of which recommendations are given on setting the permissible spindle rotational speeds. The approach can find application in adjusting cutting modes when milling box-type workpieces or panel-type parts, whose workpiece geometric shape and weight differ significantly from the finished part ones.

Keywords: finite element modeling of milling, simulation of oscillation at milling, vibration tests of tooling setup, optimum milling modes

Information about the article: Received December 03, 2018; accepted for publication January 10, 2019; available online February 28, 2019.



For citation: Kostin P.N., Lukyanov A.V. Spindle rotation speed adjustment when milling by system numerical modeling data: device-tool-workpiece. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):54–62. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-54-62.

Введение

При механической обработке резанием станок можно рассматривать как замкнутую динамическую систему [1], включающую в себя упругую систему станок-приспособление-инструмент-заготовка (СПИЗ) при возмущении, генерируемом процессами обработки – силами резания, трением и т.д. При анализе собственной устойчивости и характеристик элементов динамической системы СПИЗ можно рассматривать каждый элемент системы отдельно или в их взаимодействии.

При малой жесткости отдельно взятого элемента системы, а также при значительных длинах вылета инструмента и заготовки из устройства крепления возрастает амплитуда возможной вибрации с увеличением скорости резания [2]. При высокоскоростной обработке (ВСО) недостаточная жесткость одного из элементов системы СПИЗ может привести к резонансам, связанным с рядом негативных явлений. Таким образом, жесткость элементов системы СПИЗ оказывает существенное влияние на показатели качества обрабатываемой поверхности, износ инструмента и срок службы основного и вспомогательного технологического оборудования. Изучению вопроса формирования поверхностного слоя и повышения его качественных характеристик посвящены работы [3–5]. Вопросам влияния вибраций на качественные характеристики поверхности и состояние оборудования посвящены работы [6–9]. Вопросы описания и выявления колебаний системы станок-приспособление-инструмент-заготовка рассмотрены в работе [10], где приведена математическая модель колебаний, возникающих в системе СПИЗ, а в работах [11–13]

приведены математические модели процесса резания. В работах [6, 7, 14] приведено исследование колебаний сил взаимодействия фрезы в составе инструментальной наладки с заготовкой при скоростях вращения шпинделя 20–30 тыс. об/мин, приводящих к резонансу элементов всей технологической системы в целом.

Важным является изучение вклада в результирующие колебания каждого из элементов СПИЗ. При этом жесткость всей системы последовательно взаимодействующих элементов СПИЗ снижается, что может привести к резонансу на частоте вращения шпинделя или (что более вероятно) на зубцовой частоте фрезы. Зубцовая частота равна произведению частоты вращения шпинделя на количество режущих кромок фрезы.

В машиностроении существует класс деталей, геометрическая форма и масса готовых изделий которых существенно отличаются от геометрии и массы исходной заготовки. К таким деталям относятся формообразующие корпусные панели. Качество поверхности и точность изготовления подобных и других деталей, с большим объемом удаления металла при обработке, оказывают значительное влияние на надежность работы всего изделия. Показатели качества при этом обеспечиваются не только применением современных обрабатывающих центров, оснастки и инструментов, но и правильно назначенными режимами обработки. Поэтому возможность возникновения при ВСО резонансов от силового взаимодействия каждого из элементов системы СПИЗ требуют проведения дальнейших исследований.

Определение жесткости инструментальной наладки

Жесткость системы СПИЗ, то есть способность элементов сопротивляться деформациям при внешнем воздействии тем

выше, чем меньше вылет инструмента и заготовки из приспособлений их крепления. При использовании переходников под раз-



личные стандарты конусов шпинделей увеличивается длина инструментальной сборки и ее вылета из шпинделя станка, что приводит к снижению жесткости самой инструментальной наладки и всей технологической системы.

Например, конус HSK, применяемый при высокоскоростной и высокопроизводительной обработке, является полым. Механизм крепления модульной оснастки, например, типа Capto размещается в нижней части зажимной оправки, что увеличивает ее вылет и уменьшает жесткость. Увеличение длины вылета происходит и при использовании прочих конусных переходников.

Поэтому объектами исследования выбраны:

1. Двухзубая фреза R790-025HA06S2-16L, имеющая хвостовик под крепление в шпиндель HSK A/C.

2. Инструментальная наладка, образованная трехзубой фрезой R790-03C5S2-16M под конус Capto и переходником от ISO 7388-1 к ISO 40 C5-390.140-40 070.

Собственные частоты являются функциями физико-механических свойств материала, его геометрических характеристик и граничных условий крепления [14]. С целью определения собственных частот колебаний рассматриваемых фрез, переходника и образованной ими инструментальной наладки в САЕ-системе Femap были построены их конечно-элементные модели и произведен расчет.

При разбиении модели на конечные

элементы (КЭ) установлен автоматический способ триангуляции, в результате которой получено 68641 конечных элементов с размерами сетки 3 мм. Модели заданы физико-механические свойства стали 45: модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; плотность $\rho = 7826$ кг/м³. Первые формы собственных колебаний КЭ модели фрезы R790 с хвостовиком HSK приведены на рис. 1. При построении модели шпиндель рассматривался как жесткий элемент. Также учтено, что при креплении хвостовиков HSK базирование происходит по двум плоскостям: по конусу и плоскости, являющейся его основанием.

Аналогичным образом были получены первые формы собственных колебаний фрезы R790 с хвостовиком Capto, переходника на конус шпинделя SK и образованной ими инструментальной наладки, изображенных на рис. 2 а, b, c, соответственно.

КЭ модель колебаний инструментальной наладки под конус SK, закрепленной в шпинделе, приведена на рис. 2 d. При этом шпиндель рассматривается как жесткое закрепление, и при построении КЭ модели учтено, что SK конусы имеют базирование только по образующей плоскости конуса.

Для проверки адекватности полученных в процессе конечно-элементного моделирования данных был произведен натурный эксперимент, в ходе которого также были определены частоты колебаний фрез, переходника и образованной фрезой и переходником инструментальной наладки.

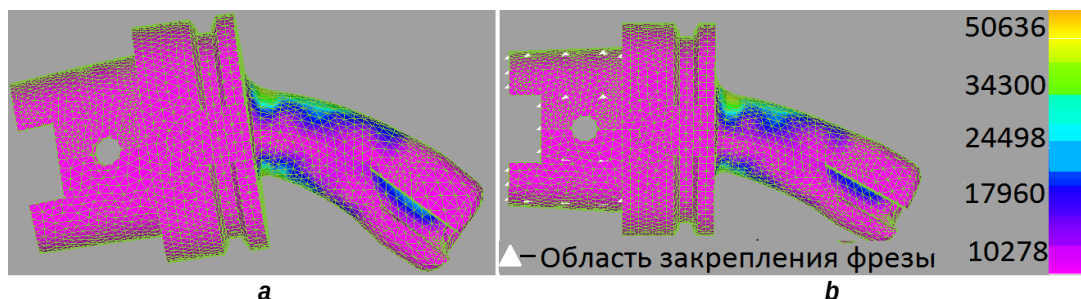


Рис. 1. Первые формы собственных колебаний фрезы типа R790 с хвостовиком HSK:
а – изгибная, частота колебаний 7213 Гц; б – частота колебаний инструментальной наладки
при ее жестком закреплении 5348 Гц

Fig. 1. First forms of natural oscillations of R790 milling cutter with a HSK shank:
а – bending, oscillation frequency is 7213 Hz; б – oscillation frequency of rigidly fixed tooling setup is 5348 Hz



Исследуемые элементы, образующие инструментальную наладку, размещались на демпфирующей поверхности – поролоне, который позволяет замерить частоту собственных колебаний без учета влияния внешней среды. Измерения колебаний элементов СПИЗ проводилось бесконтактным методом с использованием лазерного виброметра Polytec. Для возбуждения колебаний задавался одиночный ударный импульс динамометрическим молотком в направлении, противоположном положению метки лазерного указателя точки измерения колебаний, как это показано на рис. 3.

Получены спектры колебаний фрезы с конусом HSK, (рис. 4 а), а также фрезы Capto (рис. 4 б), переходника под конус SK (рис. 4 с), и образованной ими инструмен-

тальной наладки (рис. 4 d). Так как демпфирование в рассматриваемых составляющих инструментальной наладки незначительно, что доказывает и осциллограмма затухающих колебаний (рис. 5), то спектр колебаний практически дает значение частоты свободных колебаний фрезы, переходника и инструментальной наладки.

Частоту собственных колебаний инструментальной наладки можно вычислить, зная частоты собственных колебаний, образующих ее элементов. Общая податливость системы, состоящая из N -го количества элементов, определяется как сумма податливостей всех i -х элементов, входящих в систему

$$\delta = \sum_{i=1}^N \delta_i. \quad (1)$$

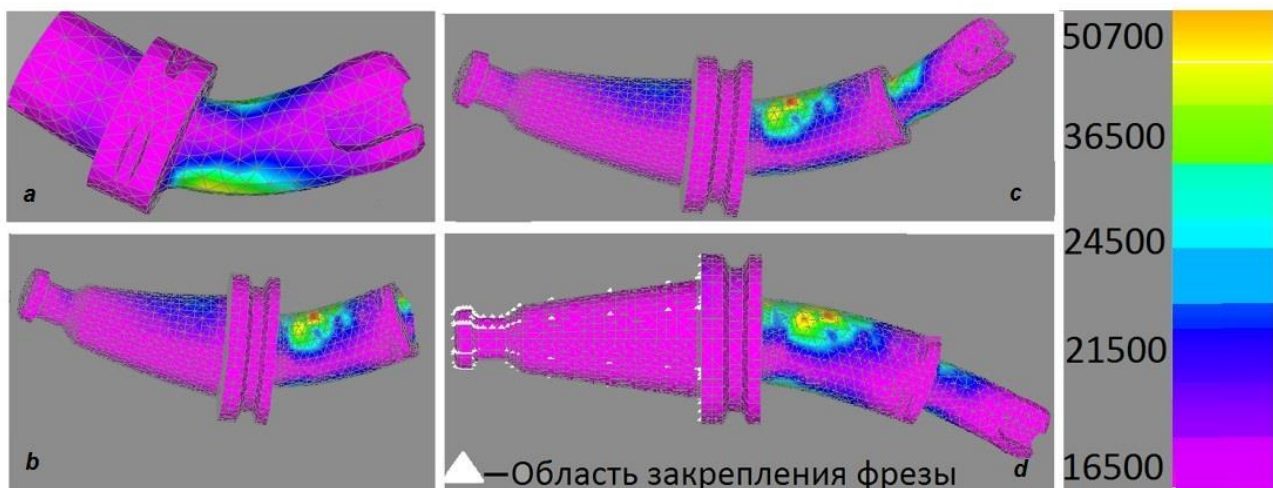


Рис. 2. Первые формы собственных колебаний фрезы типа R790 с хвостовиком Capto: а – частота колебаний фрезы 9003 Гц; б – частота колебаний переходника 7448 Гц; с – частота колебаний инструментальной наладки 4298 Гц; d – частота колебаний инструментальной наладки при ее жестком закреплении 2870 Гц

Fig. 2. First forms of natural oscillations of R790 milling cutter with a Capto shank: a – frequency of the milling cutter is 9003 Hz; b – oscillation frequency of the adaptor is 7448 Hz; c – oscillation frequency of the tooling setup is 4298 Hz; d – oscillation frequency of rigidly fixed tooling setup is 2870 Hz

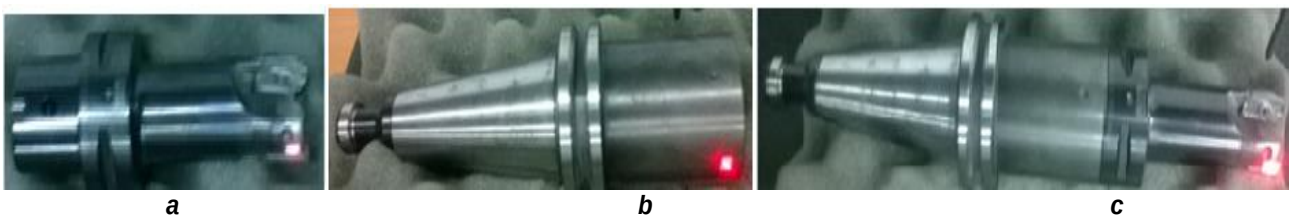


Рис. 3. Экспериментальное определение частоты собственных колебаний: а – фрезы; б – переходника; с – инструментальной наладки

Fig. 3. Experimental determination of frequency of natural oscillations of: а – a milling cutter; б – an adaptor; с – a tooling setup



Податливость δ – есть величина обратная жесткости C :

$$\delta = 1/C. \quad (2)$$

Рассматривая инструментальную наладку как систему, состоящую из N последовательно соединенных упругих элементов, можно определить суммарную жесткость системы

$$1/C = \sum_{i=1}^N 1/C_i. \quad (3)$$

Жесткость C и частота собственных колебаний f находятся в прямой зависимости друг от друга, следовательно, частоту

собственных колебаний для инструментальной наладки, состоящей из N элементов, можно определить как

$$1/f = \sum_{i=1}^N 1/f_i, \quad f = \prod_{i=1}^N f_i / \sum_{i=1}^N f_i. \quad (4)$$

Результаты конечно-элементного моделирования отличаются от данных, полученных в ходе натурного эксперимента в пределах 2,72–3,5%. Частоты собственных колебаний инструментальной наладки, вычисленные по формулам (1)–(4) на основе экспериментальных данных значений частот колебаний фрезы и переходника, расходятся с аналогичными данными конечно-элементного моделирования на 0,44%, что говорит об адекватности построенных конечно-элементных моделей.

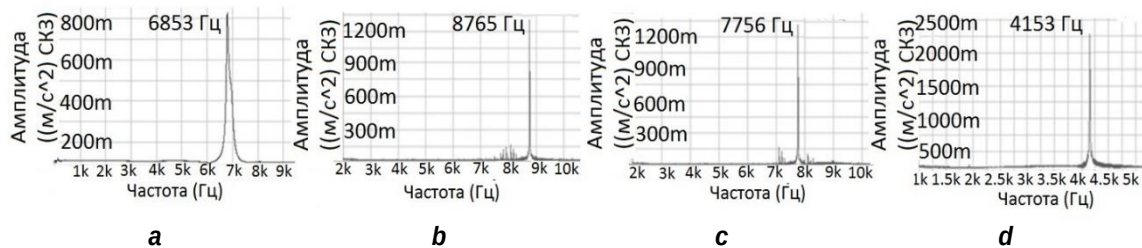


Рис. 4. Спектры собственных колебаний фрез и инструментальной наладки: а – фрезы с конусом HSK; б – фрезы с конусом Capto; с – переходника на SK; d – инструментальной наладки

Fig. 4. Spectra of natural oscillations of milling cutters and tooling setup: a – HSK shank milling cutter; b – Capto shank milling cutter; c – SK adapter; d – tooling setup

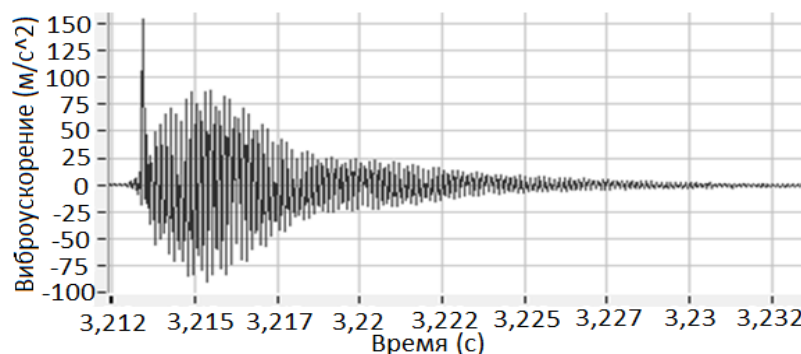


Рис. 5. Осциллограмма затухающих колебаний фрезы на конус HSK

Fig. 5. Oscillogram of damped oscillations of the milling cutter for the HSK shank

Определение частоты собственных колебаний заготовки

При фрезеровании изменяется масса и геометрия обрабатываемой (иногда значительно) заготовки, что приводит к из-

менению ее частот и форм собственных колебаний, являющихся функцией массово-жесткостных характеристик изделия. Это



может стать причиной возникновения резонансов. Поэтому желательно контролировать собственные частоты колебаний заготовки в процессе обработки резанием.

Была построена конечно-элементная модель заготовки (рис. 6) на различных стадиях обработки. Заготовка представляет собой призматический брусок с начальной высотой 200 мм, шириной 70 мм и длиной 220 мм. Заготовка зажата в губках тисов шириной 160 мм и высотой 50 мм. В конечно-элементной модели контакт губок тисов и заготовки представлен как абсолютно жесткий

(жесткая заделка). Данное допущение принято в силу значительно большей жесткости тисов по сравнению с жесткостью заготовки.

Данные конечно-элементного расчета частот собственных колебаний заготовки в процессе ее обработки показывают, что величина уступа, образуемого при фрезеровании, практически не влияет на собственную частоту колебаний заготовки. В то же время, при изменении высоты заготовки от 200 мм до 80 мм собственная частота заготовки уменьшается почти в 6 раз, что может привести к резонансу всей системы СПИЗ.

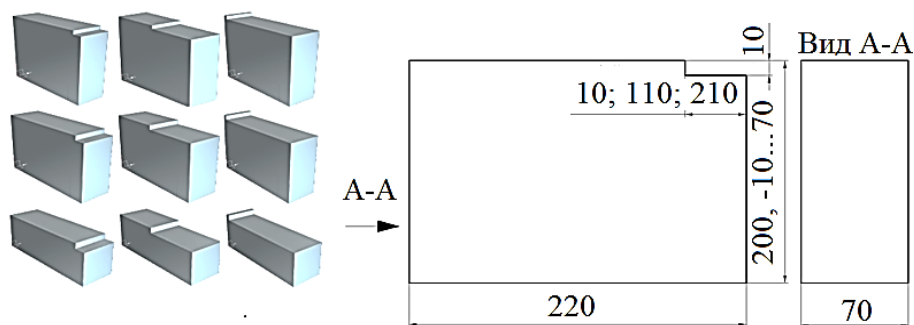


Рис. 6. Параметры моделируемой заготовки
Fig. 6. Simulated workpiece parameters

Моделирование колебаний системы приспособление-инструмент-заготовка в процессе механической обработки

Построены конечно-элементные модели СПИЗ в процессе фрезерной обработки рассмотренной заготовки взаимодействующей с:

- инструментальной наладкой, образованной фрезой Capto Z = 3 и переходником на конус SK (рис. 7 а);
- с фрезой под конус HSK с Z = 2 (рис. 7 б).

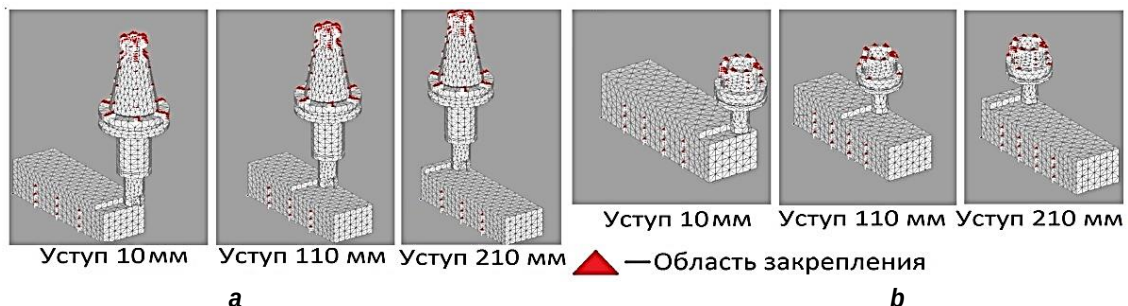


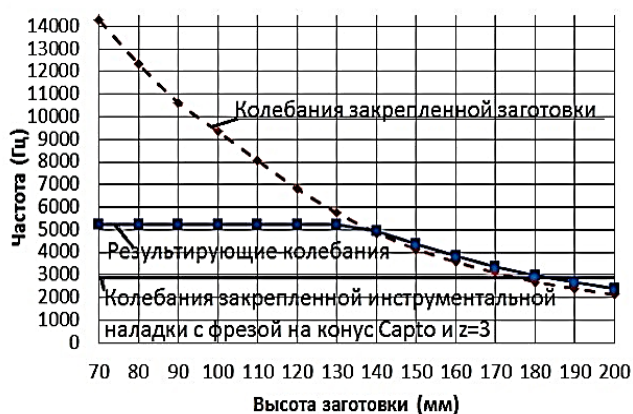
Рис. 7. Моделирование собственных колебаний в процессе фрезерования: а – заготовки с инструментальной наладкой, образованной фрезой Capto Z = 3 и переходником на конус SK; б – заготовки с фрезой под конус HSK с Z = 2 переходника
Fig. 7. Modeling of natural oscillations when milling: a – workpieces with tooling setup formed by a Capto Z = 3 milling cutter and a SK shank adapter; b – workpieces with a milling cutter for the HSK shank with Z = 2 of the adapter



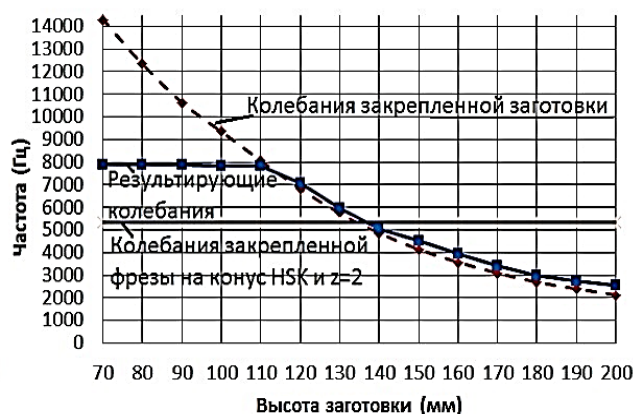
Зависимости частот колебаний жестко зажатой заготовки, взаимодействующей в процессе резания с фрезами: на конус HSK и Capto (с переходником на SK) от высоты заготовки, полученные при конечно-элементном моделировании, приведены на рис. 8.

При уменьшении высоты закрепленной обрабатываемой заготовки ее жесткость и частота свободных колебаний экспоненциально увеличиваются, тогда как жесткость и частота свободных колебаний инструментальной наладки постоянна. Однако, частота результирующих колебаний системы – инструментальная наладка-заготовка – в целом будет лежать между частотами инструментальной наладки и заготовки.

Поэтому при механической обработке заготовок, имеющих значительные изменения геометрических характеристик и массы в процессе резания, рекомендуется назначать режимы резания с плавающими параметрами, изменяющимися в процессе резания. По полученным данным, с целью отстройки от резонанса можно рекомендовать выбирать частоты вращения шпинделя из расчета, что получаемая при резании частота вращения шпинделя или зубцовая частота фрезы составляет 50% от результирующей частоты свободных колебаний всей взаимодействующей системы СПИЗ в целом (рис. 9).



a



b

Рис. 8. Результаты конечно-элементного моделирования:
a – фреза на конус Capto (переходник на SK); b – фреза на конус HSK
Fig. 8. Results of finite element modeling:
a – Capto shank milling cutter (SK adapter); b – HSK shank milling cutter

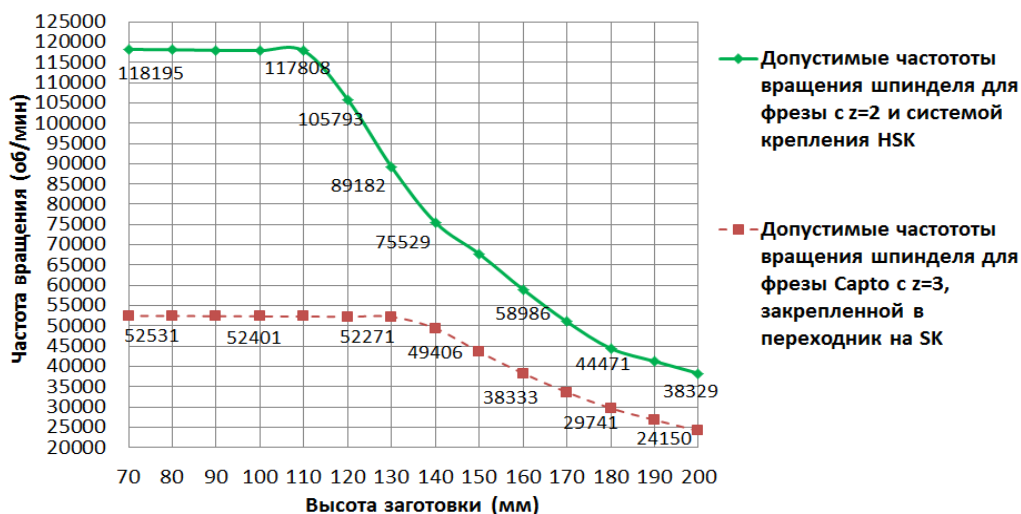


Рис. 9. Рекомендации по назначению оптимальных частот вращения шпинделя
Fig. 9. Recommendations for setting optimal spindle rotational speeds



Заключение

По построенной конечно-элементной модели колебаний системы: приспособление – инструментальная наладка-заготовка, адекватность которой была подтверждена экспериментально и аналитически, выданы рекомендации к коррекции частот вращения шпинделя. Данные рекомендации минимизируют риск возникновения резонанса в тех-

нологической системе при фрезеровании, что повысит качество готовых деталей, увеличит стойкость инструмента и ресурс технологического оборудования в целом. Предложенный метод определения рекомендуемых частот вращения шпинделя применим при фрезерной обработке деталей со значительным объемом удаления металла.

Библиографический список

1. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
2. Костин П.Н., Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Определение частот колебаний заготовки с учетом специфики ее крепления // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 8. № 3. С. 23–29.
3. Промптов А.И. Взаимосвязь характеристик поверхностного слоя, формируемого лезвийной обработкой // Известия Томского политехнического университета: Совершенствование процессов резания и поверхностного пластического деформирования. 2002. Т. 305. Вып. 1. С. 54–59.
4. Промптов А.И., Лившиц О.П. Управление качеством поверхности деталей машин при финишной обработке // Вестник Иркутского государственного технического университета. 1998. № 3. С. 34–39.
5. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6. С. 476–479.
6. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12 (83). С. 103–111.
7. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа // Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1-2. С. 42–46.
8. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. Cambridge University Press. 2012. 366 p.
9. Zhou Y., Yang W., Zhou Y., Xu Z., Shi X. Consistency evaluation of hole series surface quality using vibration signal // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 92. Issue 1-4. P. 1069–1079. DOI: 10.1007/s00170-017-0184-6
10. Зелинский С.А., Морозов Ю.А., Серебрий Ю.А. Математическая модель процесса контурного фрезерования нежестких деталей // Труды Одесского политехнического университета. 2015. С. 28–33.
11. Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: working surface description approach // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. № 6. P. 158–175. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-269
12. Voronov S.A., Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: Algorithm of surface modification and instantaneous chip thickness determination // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. № 6.
13. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 2. С. 211–216.
14. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при повышении скорости вращения шпинделя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. Т. 56. № 4. С. 70–82. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82.
15. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.

References

1. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Machine tool dynamics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967, 359 p. (In Russian)
2. Kostin P.N., Lukyanov A.V., Aleynikov D.P., Determination of the workpiece oscillation arequencies with the account of fixing specificity. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [ISTU Bulletin of Youth], 2018, vol. 8, no. 3, pp. 23–28. (In Russian)
3. Promptov A.I. Relationship of surface layer characteristics formed by the edge cutting machining. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta: Sovershenstvovanie processov rezaniya i poverhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University: Improvement of cutting processes and surface plastic deformation], 2002, vol. 305, issue 1, pp. 54–59.



4. Promptov A.I., Livshits O.P. Machine part surface quality control under finishing operations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 1998, no. 3, pp. 34–39.
5. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. The modern methods of optimization of high productive milling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6-2, pp. 476–479. (In Russian)
6. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Vibration effect on accuracy and quality of hole surface under drilling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 12 (83), pp. 103–111. (In Russian)
7. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Optimization of machining processes based on modal and dynamic analysis. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in Industry], 2013, no. 1-2, pp. 42–46. (In Russian)
8. Altintas Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*. Cambridge University Press, 2012, 366 p
9. Zhou Y., Yang W., Zhou Y., Xu Z., Shi X. Consistency evaluation of hole series surface quality using vibration signal. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 92, issue 1-4, pp. 1069–1079. DOI: 10.1007/s00170-017-0184-6

Критерии авторства

Костин П.Н., Лукьянов 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Костин Павел Николаевич, магистрант,
e-mail: kostin95pavel@mail.ru

Лукьянов Анатолий Валерианович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
e-mail: loukian@inbox.ru

10. Zelinskiy S.A., Morozov U.A., Serebriy U.A. Mathematical model of non-rigid part contour milling. *Trudi Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of Odessa Polytechnic University], 2015, pp. 28–33.
11. Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: working surface description approach. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 6, pp. 158–175. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-269
12. Voronov S.A., Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: Algorithm of surface modification and instantaneous chip thickness determination // *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 6.
13. Pyatykh A.S., Savilov A.V. The identification cutting force coefficients for simulation of the machining. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 17, no. 2, pp. 211–216. (In Russian)
14. Lukyanov A.V., Aleynikov D.P. Analysis of oscillations of cutting forces between a mill and a workpiece when increasing the spindle rotation speed. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, vol. 56, no. 4, pp. 70–82. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).70-82. (In Russian)
15. Richkov S.P. *Modeling of structures in the environment of Femap with NX Nastran*. Moscow; DMK Press Publ., 2013, 784 p. (In Russian)

Authorship criteria

Kostin P.N., Lukyanov 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

Pavel N. Kostin, Master Degree Student,
e-mail: kostin95pavel@mail.ru

Anatoly V. Lukyanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: loukian@inbox.ru



Анализ аварийности и причин выхода из строя конденсаторных установок в системе электроснабжения нефтегазодобывающего месторождения

© И.В. Алфёров*, В.М. Зырянов**, Н.А. Митрофанов***

*ООО «Айроэлектро», г. Новосибирск, Российская Федерация

**Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

Резюме: Проведение экспериментальных исследований качества электроэнергии в автономной системе электроснабжения одного из предприятий нефтегазодобывающей отрасли на шинах 0,4 кВ подстанции 6/0,4 кВ, оценка гармонического состава тока и напряжения в различных узлах электрической сети. Численный анализ степени искажения синусоидальности напряжения и тока в распределительной сети выполняется посредством инструментального замера: анализатором качества электроэнергии «Ресурс-UF2М» и цифровым осциллографом Hantek DSO 1102B. Проведен анализ нарушений технологического процесса, вызванных наличием гармонических искажений в системе электроснабжения. По полученным эксплуатационным данным собрана статистика аварийных событий различного рода электрооборудования подверженного влиянию высших гармоник. Высшие гармоники тока и напряжения существенно ухудшают условия эксплуатации основных элементов силового оборудования энергосистем, негативно влияют на устройства релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи, что в итоге, исходя из представленной статистики аварийных событий, приводит к серьезным технологическим сбоям и значительным экономическим издержкам.

Ключевые слова: высшие гармоники, анализатор качества, гармонический состав, статистика аварийных событий, конденсаторные установки, качество электроэнергии

Информация о статье: Дата поступления 19 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 22 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Алфёров И.В., Зырянов В.М., Митрофанов Н.А. Анализ аварийности и причин выхода из строя конденсаторных установок в системе электроснабжения нефтегазодобывающего месторождения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):63–74. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-63-74.

Analysis of accident rate and reasons of condensing unit failures in electrical energy supply system of oil and gas production

Igor V. Alferov, Vyacheslav M. Zyryanov, Nikolay A. Mitrofanov

AiroElectro LLC, Novosibirsk, Russian Federation

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract: The paper deals with the experimental studies of the quality of electrical energy in the stand alone system of power supply of one of the enterprises of the oil and gas industry on 0.4 kV buses of 6/0.4 kV substation as well as estimates the harmonic composition of current and voltage in various nodes of the electrical network. Numerical analysis of the distortion degree of the voltage and current waveform in the distribution network is performed using instrumental measurements by means of Resource-UF2M power quality analyzer and Hantek DSO 1102B digital oscilloscope. The analysis is given to process flow disruptions caused by the presence of harmonic distortions in the power supply system. Failure statistics for various kinds of electrical equipment exposed to higher harmonics has been collected on the base of the obtained operational data. Higher harmonics of current and voltage significantly worsen the operating conditions of the main elements of the energy system power equipment, have an adverse effect on relay protection, automation, telecontrol and communication devices, which according to the presented statistics of emergency events leads to serious technological failures and significant economic costs.

Keywords: higher harmonics, quality analyzer, harmonic composition, accident rate statistics, capacitor units, power quality

Information about the article: Received December 19, 2018; accepted for publication January 22, 2019; available online February 28, 2019.



For citation: Alferov I.V., Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A. Analysis of accident rate and reasons of condensing unit failures in electrical energy supply system of oil and gas production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):63–74. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-63-74.

Введение

В современной промышленности все большее распространение получают электропотребители с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Такие устройства потребляют из сети несинусоидальный ток, вследствие чего возникают искажения кривой напряжения. Это негативно влияет на условия эксплуатации, как силового оборудования, так и устройств релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи [1, 2]. Экономический ущерб, вызванный высшими гармониками (ВГ), обусловлен ухудшением качества электроэнергии, снижением надежности функционирования энергосистемы и сокращением срока службы оборудования.

В автономных энергосистемах нефтегазодобывающих регионов, несмотря на значительное увеличение в последнее десятилетие доли нелинейной нагрузки, приводящей к существенному искажению формы кривой напряжения и тока, обеспечению качества электроэнергии уделяется недостаточное внимание, что в итоге нередко приводит к серьезным технологическим сбоям и значительным экономическим издержкам. Кроме того, в автономных энергосистемах имеют место значительные отклонения частоты, которые снижают эффективность традиционных средств борьбы с

высшими гармониками. Более того, фильтрами высших гармоник в этих энергосистемах нередко пренебрегают.

Наиболее уязвимым оборудованием в этих условиях являются устройства компенсации реактивной мощности, которые выходят из строя от перегрузки токами высших гармоник [3]. Их ремонт в условиях удаленности сервисных центров связан со значительными затратами времени, в течение которого невозможно обеспечить адекватную степень компенсации реактивной мощности со всеми вытекающими последствиями.

Целью исследования является оценка гармонического состава токов и напряжений в различных узлах исследуемых автономных систем электроснабжения предприятий нефтегазового комплекса, сбор статистических данных по аварийным событиям различного рода оборудования, связанных с наличием высших гармоник в сетях 6 и 0,4 кВ, а также их анализ.

Для достижения поставленных задач выполнен ряд инструментальных замеров на подстанциях 35/6 кВ и КТП 6/0,4 кВ кустовых площадок. Также проведено исследование искажений формы кривых тока и напряжения, вызванных различными типами частотных преобразователей, при вариации их режимов работы.

Дополнительные потери в основных силовых элементах энергосистемы

Несинусоидальность напряжения и тока вызывает дополнительные потери в основных силовых элементах энергосистемы, затрудняет компенсацию реактивной мощности с помощью устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ), сокращает срок службы изоляции электрических машин, приводит к возникновению их дополнительной вибрации, снижает эффективность функционирования устройств автоматики,

телемеханики и связи. Все это обусловлено тем, что основное оборудование – генераторы, трансформаторы, двигатели, кабели, УКРМ проектируются для работы с синусоидальной формой кривых токов и напряжений. В их конструкции, как правило, не учитывается дополнительное воздействие токов высших гармоник.

Искажение формы кривой напряжения заметно сказывается на возникновении



и протекании процессов ионизации в материале изоляции электрических машин и трансформаторов [3]. При наличии газовых включений в изоляции происходит ионизация, с образованием и последующей нейтрализацией объемных зарядов. Нейтрализация зарядов связана с рассеянием энергии, следствием чего является электрическое, механическое и химическое воздействие на материал диэлектрика. Вследствие этого развиваются местные дефекты в изоляции, что приводит к увеличению диэлектрических потерь и, в итоге, к ее ускоренному старению и сокращению срока службы. Количество разрядов в газовых включениях зависит от формы кривой напряжения, приложенного к изоляции [3].

Высшие гармоники напряжения и тока приводят к дополнительным потерям в обмотках статора, в цепях ротора, а также в стали статора и ротора. Потери в проводни-

ках статора и ротора из-за вихревых токов и поверхностного эффекта при этом больше, чем определяемые омическим сопротивлением. То же самое относится и к трансформаторам.

Дополнительные потери приводят к повышению общей температуры машины и к местным перегревам, наиболее вероятным в роторе. Двигатели с короткозамкнутым ротором допускают более высокие потери и температуру, чем двигатели с фазным ротором. Токи высших гармоник в статоре машины приводят к появлению на валу вращающихся моментов в направлении вращения магнитного поля гармоники, что может приводить к вибрации вала двигателя.

В кабельных линиях высшие гармоники напряжения увеличивают воздействие на диэлектрик пропорционально квадрату их амплитуды, что приводит к росту числа повреждений кабелей и затрат на ремонт.

Воздействие высших гармоник на конденсаторные установки

Перетоки мощности на высших гармониках в сети значительно загружают установленные на подстанциях (ПС) и у потребителей, батареи статических конденсаторов (БСК) со стороны 6 и 0,4 кВ, соответственно. В связи с загрузкой токами ВГ в большей части возможных режимов БК не способны обеспечить полную расчетную компенсацию реактивной мощности в узле нагрузки. Кроме того, при изменении режима энергосистемы производятся коммутации ступеней устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ) автоматической системой управления, вследствие чего возникают коммутационные переходные процессы. В результате, КУ во время этих переходных процессов нагружается дополнительными токами высших гармоник, что в итоге увеличивает риск выхода из строя элементов конденсаторной установки.

Включение конденсаторных батарей или регулирование автоматическим устройством компенсации реактивной мощности $\cos\phi$ вызывает изменение конфигурации сети, в результате которого возможно появ-

ление резонанса напряжений, и, как следствие, резкого возрастания тока этой резонансной частоты. Практика показывает, что работа конденсаторных установок без защитных реакторов сопряжена с частыми неисправностями отдельных конденсаторных элементов и коммутационных устройств.

При наличии ВГ в кривой напряжения процесс старения диэлектрика в батареях конденсаторов протекает также более интенсивно, чем при работе от синусоидального напряжения. Это объясняется тем, что физико-химические процессы старения в диэлектриках значительно ускоряются при высоких частотах электрического поля. Аналогично влияет дополнительный нагрев, вызванный протеканием токов ВГ. Экспериментально показано [3], что уже при значении коэффициента несинусоидальности $k_{\text{нс}} = 5\%$ через 2 года эксплуатации $\tan\delta$ конденсаторов увеличивается в 2 раза. Несмотря на то, что конденсаторные установки могут длительно работать при перегрузке током и напряжением, срок их службы в таких условиях значительно сокращается.



Опираясь на многолетний опыт эксплуатации конденсаторных установок, можно констатировать, что поток отказов конденса-

ров в составе УКРМ по отношению к заявленному их сроку службы неуклонно возрастает.

Особенности системы электроснабжения нефтегазодобывающего месторождения

Анализ работы электрооборудования в условиях несинусоидальных напряжений и токов проведен в одной из автономных энергосистем, обслуживающих нефтегазодобывающую отрасль, в составе которой имеется значительная доля нелинейной нагрузки. В сети 6 и 0,4 кВ установлены устройства компенсации реактивной мощности, выполненные без защитных дросселей. В рассматриваемой автономной энергосистеме имеются газопоршневая (ГПЭС) и газотурбинная (ГТЭС) электростанции, работающие на попутном газе, суммарной мощностью 170 МВт, которые обеспечивают

электроэнергией всю инфраструктуру добычи и транспортировки нефти, включая жилой и административный секторы. Структура электропотребления характерна для нефтедобывающих регионов: синхронная и асинхронная нагрузка с двигателями значительной единичной мощности, с устройствами плавного пуска и частотно-регулируемыми электроприводами, выпрямительная нагрузка с устройствами подогрева скважин (УПС) и станциями управления электроцентробежных насосов (ЭЦН), осветительная и бытовая. В составе энергосистемы 10 ПС 35/6 кВ и более 100 комплектных трансформаторных подстанций (КТП).

Результаты инструментальных замеров

Оценка искажений синусоидальности в рассматриваемой автономной энергосистеме проводилась с помощью анализатора качества электроэнергии «Ресурс-UF2M». Мгновенные значения токов и напряжений в виде осциллограмм получены с помощью портативного цифрового осциллографа Hantek DSO1000.

Замеры выполнены на реальных объектах нефтегазодобычи и с целью сохранения конфиденциальности предоставляемой информации, эксплуатационные

обозначения заменены условными. В профессиональной терминологии нефтяной промышленности слово «куст» обозначает площадку, на которой непосредственно ведется добыча нефти и газа и расположено все электротехническое и технологическое оборудование, обеспечивающее этот процесс.

Результаты замеров на ПС 35/6 кВ представлены в табл. 1, 2. Измерения проведены: на вводе 6 кВ, отходящих фидерах 6 кВ и в ячейке конденсаторной батареи

Таблица 1

Коэффициенты искажения синусоидальности напряжения и тока ПС 35/6 на шинах 6 кВ

Table 1

Current and voltage waveform distortion factors at 35/6 substations on 6 kV buses

Узел замера	$k_{HCUAB}, \%$	$k_{HCUBC}, \%$	$k_{HCUCA}, \%$
Секция 6 кВ	7,4	7,6	7,5
Сечение замера	$k_{HCIA}, \%$	$k_{HCIB}, \%$	$k_{HCIC}, \%$
Ввод 6 кВ	11,4	10	10,5
Фидер № 1	34,1	33,1	35,1
Фидер № 2	61,1	59,3	63,5
БК/СВ	40,5	42,5	41,5



Таблица 2

Коэффициенты ν -ой гармонической составляющей напряжения
и тока ПС 35/6 на шинах 6 кВ

Table 2

Voltage and current ν^{th} harmonic component factors at 35/6 substations on 6 kV buses

№ гармоники	$\nu = 2$	$\nu = 3$	$\nu = 5$	$\nu = 7$	$\nu = 11$	$\nu = 13$
$k_{H_{Cun}}, \%$	0,17	0,60	8,06	2,5	1,22	0,78
Сечение замера	$k_{H_{Cin}}, \%; I_{\nu}, A$					
Ввод 6 кВ	0,7;3,4	0,7;3,5	10,9;55,8	4,6;23,3	0,3;1,7	1;5,1
Фидер № 1	2,1;1,5	1,9;1,4	30,6;22,8	14,7;10,9	5,9;4,4	4,;3,1
Фидер № 2	6,9;2,7	4,7;2,5	60,3;31,8	12,7;6,7	7,3;3,9	1,93;1
БК/СВ	0,3;0,2	0,8;0,5	41,2;25,3	18,4;11,3	12,8;7,9	7,8;4,8

6 кВ. В таблицах приняты следующие обозначения: k_{uAB} – коэффициент искажения синусоидальности линейного напряжения, k_{un} – коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения. Также в таблице отображены значения коэффициентов n -й гармонической составляющей тока k_{in} . Замеры искажений кривых тока и напряжения проведены в соответствии требованиями ГОСТ 32144-2013 на качество электроэнергии.

На рис. 1 представлена упрощенная схема опыта по замеру гармонического состава тока на ПС 35/6 кВ. Осциллограммы тока и напряжения на ПС 35/6 представлены на рис. 2, 3. Сечение замера тока – отходящий фидер № 1, узел замера напряжения – секция шин 6 кВ ПС 35/6 кВ.

Инструментальные замеры на КТП 6/0,4 кВ проведены в следующих узлах: ввод 0,4 кВ, фидер на устройство прогрева скважин; фидер на станцию управления центробежным насосом; автомат, питающий конденсаторную установку. Устройство прогрева скважин представляет собой тиристорный выпрямитель для регулирования температуры греющего кабеля. Станции управления погружными насосами типа Электрон-4 являются линейной нагрузкой и не влияют на показатели качества электроэнергии. УКРМ снабжена автоматикой регулирования дополнительных ступеней реактивной мощности (имеется возможность работы, как в автоматическом, так и в ручном режиме).

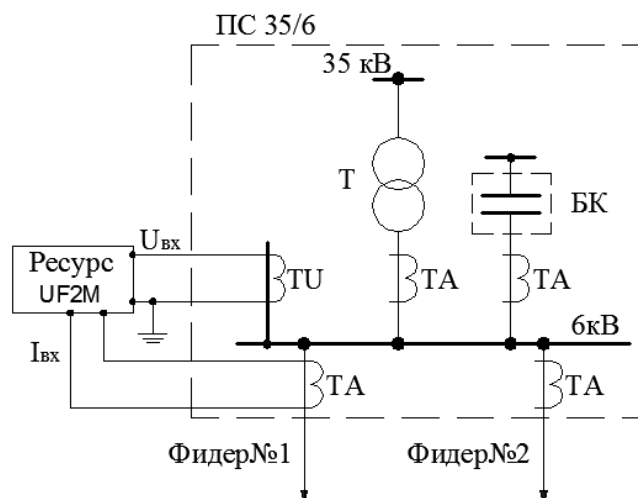


Рис. 1. Схема проведения опыта по замеру гармонического состава тока на ПС 35/6
Fig. 1. Diagram of the experiment on measuring the harmonic composition of current at 35/6 substation



Рис. 2. Осциллограмма тока на отходящем фидере №1 ПС 35/6
Fig. 2. Current oscillogram on outgoing feeder No. 1 at 35/6 substation

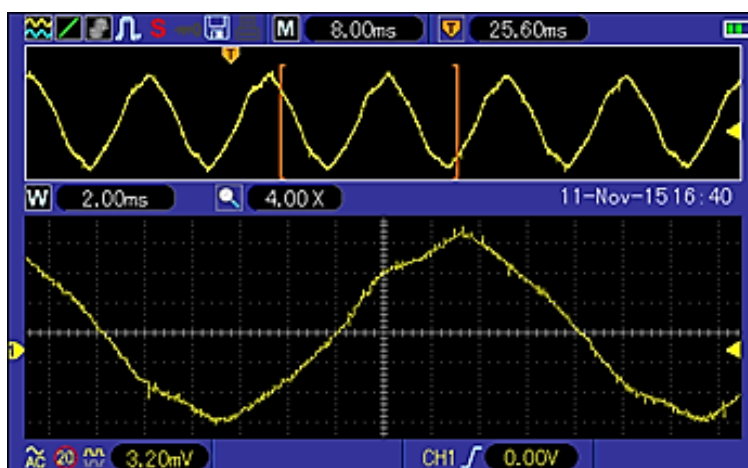


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на шинах 6кВ ПС 35/6
Fig. 3. Voltage oscillogram on 6kV buses at 35/6 substation

Таблица 3

Коэффициенты искажения синусоидальности напряжения КТП 6/0,4 на шинах 0,4 кВ

Table 3

Voltage waveform distortion coefficients at 6/0.4 transformer substation on 0.4 kV buses

Узел замера	$k_{HCUAB}, \%$	$k_{HCUBC}, \%$	$k_{HCUCA}, \%$
1 секция 0,4 кВ	6,2	6,3	6,4
2 секция 0,4 кВ	6	6	6,2
3 секция 0,4 кВ	15,3	16,3	16,4

Таблица 4

Коэффициенты искажения синусоидальности составляющих токов КТП 6/0,4

Table 4

Waveform distortion coefficients of the current components at 6/0.4 transformer substation

Сечение замера	Ввод 0,4 кВ		Фидер на УПС			БК/СВ		ЭЦН/ ЕСР
Куст	1	3	1	2	3	2	3	3
$k_{HCIA}, \%$	31,8	43	36,6	37,5	34,9	47,7	93,1	15,3
$k_{HCIB}, \%$	33,2	43,5	35,7	35,9	38,7	40,8	94,9	16,9
$k_{HCIC}, \%$	34,2	43,3	38,7	39	37,7	45,2	98,1	16,7



Рис. 4. Осциллограмма тока на вводе 0,4 кВ КТП 6/0,4 кВ, куст 1

Fig. 4. Current oscillogram at the input of 0.4 kV buses at 6/0.4 kV transformer substation, circuit 1

Результаты замеров показывают, что коэффициенты искажения синусоидальности напряжения ПС 35/6 на стороне 6 кВ и КТП 6/0,4 на стороне 0,4 кВ превышают регламентированные ГОСТ 32144-2013 РФ нормативы. Значения коэффициента 5-й гармоники на стороне 6 кВ и коэффициентов 5, 7, 11-й гармоник на стороне 0,4 кВ также выходят за нормированные стандартом пределы. Ввиду отсутствия единого стандарта в РФ по предельно допустимым гармоникам

тока, для сопоставления гармонического состава тока используем зарубежные стандарты: Австралии (AS 2279.2) и США (IEEEStd 519). Здесь так же, как и в случае с напряжением, наблюдается превышение нормативов, но в отличие от гармоник напряжения, в процентном отношении гармонические искажения по току имеют весьма существенные значения и на КТП 6/0,4 кВ их величина может составлять до

Таблица 5

Коэффициенты ν -ой гармонической составляющей напряжения и тока КТП 6/0,4

Table 5

Voltage and current ν^{th} harmonic component factors at 6/0.4 transformer substation

№ гармоники	$\nu = 2$	$\nu = 3$	$\nu = 5$	$\nu = 7$	$\nu = 11$	$\nu = 13$
$k_{H_{Cm}}, \%$ (к.1)	0,26	0,16	5,92	1,01	1,11	0,53
$k_{H_{Cm}}, \%$ (к.3)	0,12	0,26	14,2	4,35	3,18	1,22
$k_{H_{Cm}}, \%$ (к.2)	0,12	0,16	4,6	1,7	1,2	1
сечение замера	$k_{H_{Cm}}, \%; I_{\nu}, A$					
1 ввод 0,4 кВ	1,9;3,5	12,1;22,5	29,3;54,4	7,72;14,4	7,75;14,3	2,4;4,4
3 ввод 0,4 кВ	2,6;3,6	0,7;0,9	35;47,5	16,4;22,3	16,2;21,9	4,5;6
2 БК 0,4 кВ	0,17;0,08	0,47;0,23	22,8;11	11,7;5,62	13,6;24	13,5;6,5
3 БК 0,4 кВ	0,38;0,2	1,69;0,81	72;35	31;15	40,6;19,7	18,1;8,8
2 УПС 0,4 кВ	4,61;2,2	6,6;3,13	42,9;20,3	10,6;5,01	12,5;5,9	3;1,41
1 УПС 0,4 кВ	3,3;1,85	3,96;2,2	31,9;17,7	11,32;6,3	11,19;6,3	3,68;2,1
3 УПС 0,4 кВ	3,47;1,3	2,28;0,86	28,7;10,8	11,26;4,3	9,76;3,7	6,85;2,6



50% от основной гармоники тока. Такое искажение формы кривой тока, согласно стандарту США, считается недопустимым, так как оборудование энергосистемы не рассчитано на эксплуатацию при таком качестве электроэнергии. Очевидно, что в РФ нормирование степени искажения формы кривой тока также со временем будет введено.

Также стоит отметить значительные искажения кривой тока при замере на конденсаторных батареях. Перегрузка БК токами высших гармоник достигает величины тока основной гармоники, что не проходит бесследно для работы конденсаторных батарей, о чем свидетельствует статистика аварийных событий, приведенная ниже.

Статистика аварийных событий

В настоящее время задача повышения качества электроэнергии становится еще более актуальной, что подтверждает большое количество научных трудов и исследований в этой области [4–6]. Значительный вклад в исследования несинусоидальных режимов и их влияние на функционирование энергосистем внес И.В. Жеженко [3–8].

Для предприятий нефтедобычи характерно частое изменение состава нагрузки и наличие УКРМ со ступенчатым регулированием и автоматической системой управления, которые реагируют на изменение режима сети изменением своей компенсирующей способности. Ввиду значительной разветвленности системы электроснабжения и большого количества устройств компенсации реактивной мощности, установленных у потребителей, изменение режима нагрузки, совместно с несинхронизированной работой компенсирующих устройств, повышает вероятность возникновения резонанса напряжений на частотах, отличных от основной гармоники системы [7]. Резонанс напряжений на высших гармониках приводит к появлению в сети токов соответствующих частот. По этой причине возникают значительные перетоки высших гармоник в системе, спрогнозировать которые не представляется возможным. Подробнее о данном эффекте описано в [9].

Коммутационные переходные процессы, при включении ступеней КУ, могут приводить к выходу из строя питающих автоматов, магнитных пускателей, предохранителей и, как следствие, отключению установки. Кроме того, КУ коммутации нагружаются дополнительными токами высших гар-

моник, что в итоге увеличивает риск выхода из строя элементов конденсаторной установки.

Нарушение технологического процесса в связи с наличием высших гармоник в системе помимо потерь мощности, снижения производительности добычи нефти и возможной ее локальной остановки, сопровождается авариями, приводящими к выходу из строя оборудования. На БК 0,4 кВ это проявляется в выходе из строя питающих автоматов, а перегрузка токами ВГ сопровождается вздутием и взрывам конденсаторных банок. В результате чего на время ремонта установка находится в нерабочем состоянии, и, как следствие – предприятие несет убытки от дополнительных потерь электроэнергии, вызванных некомпенсированным перетоком реактивной мощности к потребителю [10–14].

С целью подтверждения актуальности рассматриваемой проблемы и подтверждения описанных выше негативных факторов, вызванных действием высших гармоник на оборудование энергосистемы, собрана статистика аварийных событий оборудования, работающего в условиях резкой несинусоидальности кривых тока и напряжения.

В табл. 6 представлены сведения об аварийных выходах из строя конденсаторных установок напряжением 0,4 и 6 кВ.

В совокупности зафиксировано более 60 аварийных событий, связанных с работой устройств компенсации. Большая часть неисправностей вызвана вздутием и взрывами конденсаторных батарей и выходом из строя автоматов нагрузки. У конденсаторных батарей, работающих на напряже-



нии 6 кВ, наблюдаются пробой изоляции кабельных вставок, и перегорание предохранителей.

Помимо проблем с работой устройств компенсации реактивной мощности гармонические искажения негативно влияют на условия эксплуатации установок прогрева скважин – дополнительная нагрузка токами ВГ вызывает их перегрузку и, как следствие, сбой в работе. Отключение УПС или их неустойчивое функционирование в свою очередь ухудшают производительность добычи нефти (дебита нефти), так как в зимний период отключение оборудования прогрева скважин более чем на 2 дня вызывает «запарафинивание» скважины. Случай остановки устройства прогрева скважин был зафиксирован непосредственно во время проведения замера качества электроэнергии. Предварительно перед отключением процесс работы сопровождался значительными искажениями

тока и напряжения.

Статистика работы устройств прогрева скважин за 2017 г. представлена в табл. 7. Основными причинами отказов в работе и частых отключений устройств прогрева скважин являются: перегрузка по току, выход из строя автоматов нагрузки, пробой изоляции греющего кабеля, пробой тириستоров. В табл. 7 отображено количество неисправностей за временной интервал, указанный в первом столбце. Также на экономическую составляющую ущерба влияют затрачиваемые ресурсы персонала (нормо-часы и использование автотранспорта).

Также в рамках исследования удалось выявить нарушения технологического процесса, связанного с наличием высших гармоник в системе электроснабжения и для нефтегазодобывающего месторождения, система которого объединена с ЕЭС. Ниже приведена статистика для этого месторождения.

Таблица 6

Статистика аварийных отключений БК 0,4 и 6кВ за 2016–2017 года

Table 6

Statistics of emergency shutdowns of 0.4 and 6kV capacitor banks for the period of 2016–2017

Вид неисправности	Разрушение элементов БК	Неисправность АВ-0,4кВ	Σ
Количество аварий	53	11	64
Потери мощности, кВар	10860	1970	12830
Затраты на восстановление, тыс. руб.	4344	96	4440

Таблица 7

Статистика работы устройства прогрева скважин за 2017 г.

Table 7

Statistics of well heating device operation for 2017

Временной интервал	Вид неисправности	
	Выход из строя	Частые отключения
01.01-31.01	16	28
01.02-28.02	18	9
01.03-31.03	23	29
01.04-30.04	22	12
01.05-31.05	14	6
01.09-30.09	21	20
01.10-10. 31	28	16
01.11-10.11	38	10



Помимо явных затрат на восстановление вышедшего из строя от действия высших гармоник оборудования, существуют дополнительные потери в ВЛ от недокомпенсации реактивной мощности в узлах нагрузки. В табл. 8 отображена фактическая загрузка конденсаторных батарей, установленных в различных узлах электроэнергетической сети напряжением 6 и 0,4 кВ. Лишь малая часть отключенной мощности объясняется причинами режимного характера (отсутствия необходимости компенсации в данном узле нагрузки. Также надо отметить, что представленная статистика составлена по официальным сводкам и показаниям, фактически же при реальном осмотре по ме-

сту установки конденсаторных батарей более 80% из них оказались в нерабочем положении. По результатам опроса обслуживающего персонала, отвечающего за сетевые районы по месту установки БК, выяснилось, что большинство устройств выведены намеренно, по причине значительных перегрузок БК и выходов из строя конденсаторных элементов.

Аналогично замерам, выполненным в автономной энергосистеме, в рассматриваемой сети ярко проявляются последствия действия высших гармоник на основное оборудование. Собранная статистика по отказам в работе конденсаторных батарей приведена в табл. 9.

Таблица 8

Статистика по устройствам компенсации реактивной мощности системы электроснабжения рассматриваемого месторождения

Table 8

Statistics on reactive power compensation devices of the power supply system of the field in question

Тип установки	U _{ном} , кВ	Установленная мощность, кВар	Мощность выведенных из работы, кВар
MVPC-ph	6	9000	2475
УКЛ57	6	34725	11250
КС	6	2706	226,5
КЭК/	6	29760	6810
Siemens MKK	0,4	11206	1927
SCADP	0,4	4075	370
КЭ1(2)/	0,4	1782	1080
КПС/	0,4	8550	3850
КЭПС/	0,4	4391	1013
УКМ58(П)	0,4	48185	10800
УК	0,4	5087	1100

Таблица 9

Статистика аварийных отключений БСК 0,4 и 6кВ за I, II квартал 2017 г.

Table 9

Statistics of emergency shutdowns of 0.4 and 6 kV static capacitor banks for the I, II quarter of 2017

Вид неисправности	Разрушение элементов БК	Неисправен АВ-0,4кВ	Неисправен МП-0,4кВ	Σ
Количество аварий	43	8	18	69
Потери мощности, кВар	4354	1020	1233	6607
Затраты на восстановление, тыс. руб.	1698	80	232	2010
Ущерб от недокомпенсации, тыс. руб.	254,8			



Отразив в денежном эквиваленте затраты на восстановление оборудования и стоимость потерь из-за недокомпенсации реактивной мощности в обеих системах за два года, только по конденсаторным батареям ущерб составляет более 6.5 млн. руб.

Результаты исследования свидетельствуют о значимости вопроса влияния высших гармоник на надежность и эконо-

мичность систем электроснабжения нефтегазодобывающих предприятий.

Количество аварийных событий и оценка ущерба от них делают актуальными разработку и внедрение мер по подавлению или локализации высших гармоник в системах электроснабжения. Подготовка мероприятий по ограничению высших гармоник требует тщательной проработки при учете специфики конкретной энергосистемы.

Библиографический список

1. Боярская Н.П., Довгун В.П., Шевченко Е.С., Егоров Д.Э. Широкополосные силовые фильтры гармоник // Ползуновский вестник. 2013. № 4–2. С. 34–38.
2. Добрусин Л.А. Оптимальные фильтрокомпенсирующие устройства для силовых полупроводниковых преобразователей // Современная электроника. 2005. № 6. С. 56–59.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах промышленного электроснабжения промпредприятий; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Анализ гармонического состава тока и напряжения на шинах 0,4 кВ КТПН и применение устройств ограничения высших гармоник // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 63–63.
5. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
6. Боярская Н.П., Кунгс Я.А., Темербаев С.А., Довгун В.П., Синяговский А.Ф. Проблемы обеспечения качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ // Ползуновский вестник. 2012. № 4. С. 89–94.
7. Довгун В.П., Темербаев С.А., Барыбин П.А. Анализ установившихся режимов в электрических цепях с коммутируемыми элементами // Журнал Сибирского федерального университета: Серия техника и технологии. 2011. № 6. С. 661–669.
8. Скакунов Д.А. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4–6 кВ Ачинского НПЗ // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2012. № 7. С. 37–42.
9. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
10. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 1. С. 24–29.
11. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Анализ гармонического состава напряжения частотного электропривода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 1. С. 154–159.
12. Митрофанов Н.А. Анализ гармонического состава напряжения преобразователя частоты MITSUBISHI FR-A540ECR // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сборник научных трудов VII Междунар. науч. конф. молодых ученых (г. Новосибирск, 9–12 июня, 2015 г.). Новосибирск, 2015. С. 71–74.
13. Зырянов В.М., Митрофанов Н.А. Гармонический состав напряжения преобразователя частоты MITSUBISHI FR-A540ECR // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докладов 4-й Междунар. науч.-практ. конференции (г. Екатеринбург, 26–28 мая 2015 г.). Екатеринбург, 2015. С. 168–171.
14. Митрофанов Н.А. Использование силовых фильтров для ограничения высших гармоник в сети // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов (г. Новосибирск, 1–5 декабря, 2015 г.). Новосибирск, 2015. С. 35–37.

References

1. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Shevchenko E.S., Egorov D.E. Wideband harmonic power filters. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Vestnik], 2013, no. 4–2, pp. 34–38. (In Russian)
2. Dobrusin L.A. Optimal filter-compensating devices for power semi-conductor transducers. *Sovremennaya elektronika* [Modern Electronics], 2005, no. 6, pp. 56–59. (In Russian)
3. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher harmonics in commercial power supply systems of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p. (In Russian)
4. Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A., Sokolovsky Yu.B. Analysis of current and voltage harmonic composition on 0.4 kV KTPN buses and use of devices for limiting higher



harmonics. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 2, pp. 63–63. (In Russian)

5. Arrillag J., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemah* [Harmonics in electrical systems]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, 320 p. (In Russian)

6. Boyarskaya NP, Kungs Ya.A., Temerbaev SA, Dovgun V.P., Sinyagovsky A.F. Problems of ensuring the electrical power quality in urban distribution networks of 0.4 kV. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Vestnik], 2012, no. 4, pp. 89–94. (In Russian)

7. Dovgun V.P., Temerbaev S.A., Barybin P.A. Steady-state analysis of networks with switched elements. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta: Seriya tekhnika i tekhnologii* [Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technologies], 2011, no. 6, pp. 661–669. (In Russian)

8. Skakunov D.A. Methods and means of quality assurance in electricity distribution network of 0.4-6 kV of Achinsk refinery. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanij* [World of Oil Products. The Oil Companies' Bulletin], 2012, no. 7, pp. 37–42. (In Russian)

9. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Indicators of electrical energy quality and their monitoring at industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 252 p. (In Russian)

10. Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A., Sokolovsky Yu.B. Research of voltage harmonic contain in frequency converter. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power

Engineering University], 2015, no. 1, pp. 24–29. (In Russian)

11. Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A., Sokolovsky Yu.B. Research of voltage harmonic contain in frequency converter. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East], 2015, no. 1, pp. 154–159. (In Russian)

12. Mitrofanov N.A. Analysis of the harmonic composition of voltage of the MITSUBISHI FR-A540ECR frequency converter. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii molodykh uchenykh "Elektrotehnika. Elektrotekhnologiya. Energetika"*. [Collection of scientific papers of VII International Scientific Conference of Young Scientists "Electrical Engineering. Electrotechnology. Energy Sector", Novosibirsk, June 9–12, 2015]. Novosibirsk, 2015. (In Russian)

13. Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A. Harmonic composition of voltage of the MITSUBISHI FR-A540ECR frequency converter. *Sbornik dokladov 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Effektivnoye i kachestvennoye snabzheniye i ispol'zovaniye elektroenergii"* [Collection of reports of the 4th International scientific and practical conference "Efficient and High-Quality Supply and Use of Electricity", Ekaterinburg, May 26–28, 2015]. Ekaterinburg, 2015, pp. 168–171. (In Russian)

14. Mitrofanov N.A. Use of power filters to limit higher harmonics in networks. *Sbornik nauchnykh trudov "Nauka. Tekhnologii. Innovacii"* [Collection of scientific papers "Science. Technology. Innovations", Novosibirsk, 1-5 December, 2015]. Novosibirsk, 2015, pp. 35–37. (In Russian)

Критерии авторства

Алферов И.В., Зырянов В.М., Митрофанов Н.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Alferov I.V., Zyryanov V.M., Mitrofanov N.A. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алферов Игорь Владимирович, директор, e-mail: alferov.igor@inbox.ru

Зырянов Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, e-mail: zvmov@ngs.ru

Митрофанов Николай Александрович, аспирант, e-mail: n.a.mitrofanov27@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Alferov, Director, e-mail: alferov.igor@inbox.ru
Vyacheslav M. Zyryanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Electric Power System, e-mail: zvmov@ngs.ru

Nikolay A. Mitrofanov, Postgraduate student, e-mail: n.a.mitrofanov27@gmail.com



Оригинальная статья / Original article
УДК 621.311.001; 621.316.1; 621.311.2
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-75-89>

Применение всережимного моделирующего комплекса для энергосистем с распределенной генерацией

© А.Б. Аскаров¹, А.А. Суворов², М.В. Андреев³

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

Резюме: В настоящее время в мире происходит рост числа объектов распределенной генерации в основном за счет возобновляемых источников энергии. Однако интеграция большого объема распределенной генерации (на базе ветровых электростанций) в существующих электроэнергетических системах сопряжена с рядом существенных проблем. Для всестороннего исследования и абсолютного решения этих проблем необходимо проведение детального моделирования реальных электроэнергетических систем, что неосуществимо при использовании существующих средств. Поэтому для подобной цели в статье предложено использовать альтернативное решение – всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем. При проведении экспериментальных исследований производилось сравнение результатов моделирования небольшой тестовой схемы электроэнергетических систем, полученных с помощью всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем и широко используемого цифрового программно-аппаратного комплекса RTDS. В статье частично представлены результаты комплексного сравнения при воспроизведении аналогичных моделей электроэнергетических систем в обоих комплексах, которые подтверждают адекватность получаемой с помощью всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем информации о процессах в оборудовании и электроэнергетических систем в целом. Доказано, что дальнейшее применение всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем в качестве инструмента для детального и адекватного моделирования реальных электроэнергетических систем с распределенной генерацией позволит обеспечить получение полной и достоверной информации о нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессах в электроэнергетических системах с распределенной генерацией, которая необходима для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и последующей эксплуатации электроэнергетических систем с распределенной генерацией.

Ключевые слова: моделирование электроэнергетических систем, распределенная генерация, численное интегрирование, гибридное моделирование

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Договор № 14.У30.18.2379-МК от 17.01.2018 г. «Исследование влияния спектра процессов в электроэнергетических системах со значительной долей распределенной генерации и возобновляемыми источниками энергии на функционирование устройств релейной защиты и разработка методики ее адекватной настройки».

Информация о статье: Дата поступления 25 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 29 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Аскаров А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В. Применение всережимного моделирующего комплекса для энергосистем с распределенной генерацией. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):75–89. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-75-89.

Use of all-mode modeling complex for power systems with distributed generation

Alisher B. Askarov, Aleksey A. Suvorov, Mikhail V. Andreev

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Abstract: Today, the number of distributed generation facilities in the world is growing mainly due to renewable energy sources. However, the integration of a large volume of distributed generation (on the basis of wind power plants) into the existing electric power systems of power grids is associated with a number of significant problems. A comprehensive study and absolute solution of these problems require to conduct a detailed simulation of real electric power systems, which is impossible with the use of existing means. Therefore, for this purpose, the article proposes to use an alternative solution – an All-Mode real time modeling complex of power systems (AMRTMC PS). The conducted experimental studies involved the comparison of the modeling results of a small test circuit of electric power systems obtained by means of the AMRTMC PS and a widely used digital software and hardware complex RTDS. The article partially presents the results of complex comparison when reproducing similar models of electric power systems in both complexes, which confirm the adequacy of



the information about the processes in equipment and electric power systems in general obtained by means of the real-time all-mode modeling complex of electric power systems. It is proved that the further application of the real-time all-mode modeling complex of electric power systems as a tool for detailed and adequate modeling of real electric power systems with distributed generation will provide complete and reliable information about normal and abnormal quasi-steady-state and transient processes in electric power systems with distributed generation, which is necessary for reliable and effective solution of design problems, research and subsequent operation of electric power systems with distributed generation.

Keywords: power system simulation, distributed generation, numerical integration, hybrid modeling

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Contract no. 14.Y30.18.2379-MK from 17 January 2018. "Study of the effect of the range of processes in power systems with a high percentage of distributed generation and renewable energy sources on relay protection device operation and development of methods for its adequate tuning".

Information about the article: Received December 25, 2018; accepted for publication January 29, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev M.V. Use of all-mode modeling complex for power systems with distributed generation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):75–89. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-75-89.

Введение

В настоящее время во многих странах мира широкое распространение получают объекты распределенной генерации (РГ), включающие в себя возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Самые активно развивающиеся виды ВИЭ на сегодняшний день – это ветровые электростанции (ВЭС) и солнечные электростанции (СЭС). В итоге, в конце 2017 г., мощность ВЭС в мире составила примерно 539 ГВт, СЭС – 402 ГВт, что показывает прирост мировой ветроэнергетики и солнечной энергетики на 11% и 33%, соответственно, по сравнению с предыдущим годом [1]. Интеграция большого объема РГ на базе ветроустановок и фотоэлектронных панелей в существующие электроэнергетические системы (ЭЭС) сильно изменяет структуру генерирующих мощностей,

а также приводит к проблемам режимного и противоаварийного управления ЭЭС [2–4]. Также возникают проблемы неравномерности и труднопрогнозируемости режимов работы ВИЭ, оценки их влияния на режимы и процессы в ЭЭС. В частности, увеличение уровня токов короткого замыкания (КЗ) и изменение его направления сильно влияет на устройства релейной защиты (РЗ) и нарушает их функциональность и селективность (например, появление «мертвой зоны» у РЗ [5], ее ложное срабатывание [6] и др.). Все это значительно усложняет управление ЭЭС, особенно в аварийных режимах. Повышение живучести и надежности ЭЭС с большой долей РГ является чрезвычайно актуальной задачей для мировой энергетики в целом.

Проблема моделирования реальных электроэнергетических систем с распределенной генерацией в рамках существующего сугубо одностороннего подхода

Для всестороннего и детального исследования поведения объектов РГ в ЭЭС, их влияния на ЭЭС, в том числе и на устройства РЗ, необходимо проведение широкого спектра расчетов нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в ЭЭС с РГ. При этом необходимо учитывать все возникающие характерные для РГ особенности, такие как инерционность объектов РГ, переменный режим выработки электроэнергии от ВИЭ и др. Для проведения подобного вида исследований

широко используется математическое моделирование. Учитывая единство и непрерывность процесса производства, преобразования, транспортировки и потребления электроэнергии, а также тесную взаимосвязь задействованного в этом процессе оборудования, возникает неизбежная необходимость моделирования большой ЭЭС, т.е. необходима достаточная детализация каждого функционального блока не только определенного объекта РГ, но и всей совокупной модели ЭЭС. Это связано с тем, что при значительном эквивалентировании



схем ЭЭС «теряется» влияние отдельных элементов или их групп на режим ЭЭС [7]. В частности, в [7] доказывалось, что при использовании эквивалентной модели ВЭС, представленной в виде одного ветрогенератора, невозможно достичь адекватных результатов моделирования, которые совпадали бы с реальными данными на допустимом уровне. Это связано с тем, что отдельные ветроустановки, которые на самом деле распределены по огромной территории, по-разному реагируют на возникающие возмущения (особенно аварийные) из-за их различных механических и электрических параметров (скорость ветра, электрическая удаленность от места присоединения и т.д.). Также стоит отметить, что динамика протекания процессов, особенно при возникновении каких-либо возмущений, для больших и для малых моделей ЭЭС может значительно различаться [8].

Совокупная математическая модель любой реальной ЭЭС (включающей в себя модели электрических машин, трансформаторов, линий электропередач, ветротурбин, силовых преобразователей, солнечных панелей и т.д.), даже с учетом допустимого частичного эквивалентирования, всегда содержит жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности и высокого порядка. Такая система не может быть решена аналитически, а – согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений – плохо обусловлена на ограничительных условиях применимости методов их численного интегрирования: решения дифференциального уравнения должны удовлетворять условию Липшица, длина интервала решения ограничивается теоремой Далквиста и др. [9–12] Единственным путем улучшения обусловленности является снижение жесткости, дифференциального порядка и ограничение интервала решения. Это реализуемо только за счет существенных упрощений и ограничений: декомпозиции режимов и процессов в ЭЭС; использования однолинейных расчетных схем вместо трехфазных; описания

сетевых элементов статическими математическими моделями в виде соответствующих алгебраических уравнений; ограничения интервала воспроизведения процессов и др. При этом, независимо от упрощений и ограничений, всегда неизвестной остается методическая ошибка решения, присущая численному интегрированию [13]. В результате достоверность такого рода расчетов нередко оказывается низкой и к тому же неопределенной, что подтверждают выполненные в последние годы сравнения результатов моделирования с натурными данными [14, 15].

Все вышеобозначенное наследуется средствами реализации численного интегрирования и определяет ограниченные свойства и возможности используемых в мировой электроэнергетике многочисленных программно-вычислительных комплексов (ПБК) (Eurostag, PowerFactory, PSS/E, PSCAD/EMTDC и др.). При этом ПБК априори малоэффективны при моделировании больших и детальных моделей ЭЭС, а их вычислительные мощности и возможности сильно ограничены (даже при использовании достаточно мощных персональных компьютеров) по сравнению со специализированными программно-аппаратными комплексами (ПАК) для моделирования ЭЭС (RTDS, eMEGASIM, HYPERSIM, ADPSS и др.). Однако стоит отметить, что у широко используемых на практике различных цифровых ПАК существуют свои проблемы и их различные решения для моделирования больших ЭЭС с учетом различного рода оборудования, в том числе ВИЭ. Как отмечается в [16], в перечисленных ПАК заданная пользователем схема ЭЭС разделяется автоматически на фрагменты – подсистемы, которые затем распределяются по вычислительным модулям (пользователь никак не может это предопределить), что в свою очередь приводит к неравномерному распределению нагрузки на процессоры. В таком случае общая вычислительная способность ПАК будет ограничена скоростью модуля, на который загружена самая большая подсистема. Для решения этой проблемы авторами [16] разработана специальная плата



(«multi-FPGA»), которая позволяет группировать моделируемое оборудование ЭЭС в зависимости от необходимости их детализации и распределять эти группы в соответствующие вычислительные модули. При этом акцент в [16] делается явно на вычислительной способности средств решения, но адекватность получаемых результатов моделирования никак не доказана.

Существуют другие подходы к моделированию больших ЭЭС, реализующие разделение схемы и моделируемого оборудования между подсистемами двух типов [17, 18]: в первом типе производится расчет электромагнитных переходных процессов (детальное моделирование отдельного элемента ЭЭС) – «electromagnetic transient simulation» (EMT); во втором – расчет электро-механических переходных процессов (упрощенное моделирование внешней ЭЭС) – «transient stability analysis simulation» (TSA). Принцип данных подходов основан на том, что EMT осуществляется на ПАК, к которому подключается подсистема TSA через эквивалентную схему Тевена (или Нортона), представляющую внешнюю ЭЭС. Применение ПАК для EMT дает возможность исследовать переходные процессы в конкретном оборудовании при КЗ, коммутациях, грозовых разрядах и моделировать устройства на базе силовой полупроводниковой техники с малым шагом моделирования. Однако использование TSA не позволяет полно и достоверно воспроизводить процессы во внешней ЭЭС, поскольку в ней неизбежно используются упрощения и ограничения, перечисленные ранее.

Таким образом, даже при разных подходах к моделированию больших ЭЭС с

применением цифровых ПАК упрощаются математические модели электрических машин; сетевые элементы представляются статическими моделями; используется разный шаг интегрирования в отдельных «частях» ЭЭС (детально смоделированная часть, как правило, имеет шаг в 50 мкс, остальная часть – 2 мс), что приводит к необходимости осуществления обмена информацией между ними с самым большим используемым шагом. В итоге проблема полноты и достоверности расчетов режимов и процессов в реальных ЭЭС с РГ сохраняется до сих пор.

Методологической альтернативой, позволяющей решить проблему достаточно полного и достоверного моделирования реальных ЭЭС с РГ, является подход, представляющий собой гибридное моделирование [19–21]. Этот подход открывает возможность для каждого значимого аспекта сложной проблемы подбирать и создавать наиболее эффективные методы и средства, совокупность которых обеспечивает требуемый уровень решения проблемы в целом. На сегодняшний день одним из наиболее развитых и проработанных решений в области гибридного моделирования энергосистем является разработанный в Томском политехническом университете Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [22]. В данной работе рассматривается возможность использования ВМК РВ ЭЭС в качестве инструмента для детального и адекватного моделирования реальных ЭЭС с РГ с целью решения вышеобозначенных задач, возникающих в современных ЭЭС с РГ.

Альтернативное решение проблемы моделирования реальных электроэнергетических систем с распределенной генерацией

ВМК РВ ЭЭС основан на концепции гибридного моделирования и не имеет обозначенных в предыдущем разделе упрощений и ограничений, т.к. принцип его работы объединяет в себе три подхода – аналоговый, физический и цифровой, что в целом позволяет:

– использовать для всех элементов ЭЭС всережимные математические модели с полноценным учетом основного и вспомогательного оборудования, адекватно воспроизводящие в них реальный непрерывный спектр всевозможных нормальных и аномальных процессов;

– исключить необходимость декомпозиции и ограничения интервала воспроизведения процессов;

– осуществлять в реальном времени непрерывное моделирование ЭЭС, в том числе с учетом функционирования средств релейной защиты, режимной и противоаварийной автоматики.

Для обеспечения методически точного, параллельного, непрерывного решения в реальном времени и на неограниченном интервале времени жестких, нелинейных систем дифференциальных уравнений высокой размерности, образуемых всережимными математическими моделями, в ВМК РВ ЭЭС используется метод непрерывного неявного интегрирования (рис. 1). При этом единственным условным ограничением точности моделирования является инструментальная погрешность интегральных

микроэлектронных элементов ВМК РВ ЭЭС, определяемая их частотными и фазовыми характеристиками. Данная погрешность составляет не более 1% при воспроизведении значимого спектра процессов в ЭЭС.

Физический подход (рис. 2) используется для обеспечения связи элементов ЭЭС, возможности практически неограниченного увеличения размера моделируемых ЭЭС с РГ, адекватного воспроизведения спектра всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций, включая пофазные, аналогично тому, как это осуществляется в реальной ЭЭС, путем преобразования непрерывных математических переменных фазных токов моделируемых элементов ЭЭС в соответствующие им модельные физические токи и напряжения, что также устраняет указанные проблемы цифрового обмена данными.

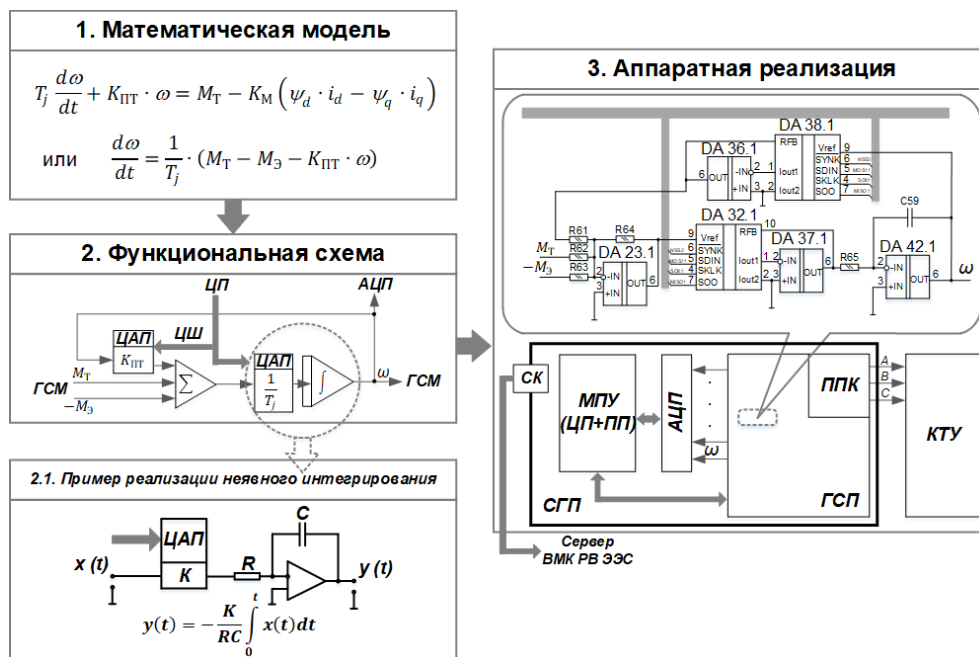


Рис. 1. Реализация метода непрерывного неявного интегрирования (на примере уравнения движения ротора): ЦП – центральный процессор; ЦШ – цифровая шина; АЦП, ЦАП – аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователь соответственно; ГСП – гибридный сопроцессор; ПП – периферийный процессор; МПУ – микропроцессорный узел; ППК – продольно-поперечные коммутаторы; СК – сетевой коммутатор; КТУ – коммутатор трехфазных узлов; СГП – специализированный гибридный процессор

Fig. 1. Implementation of the continuous implicit integration method (as on the example of the rotor motion equation): ЦП (CP)– central processor; ЦШ (DB)– digital bus; АЦП, ЦАП (ADC, DAC) – analogue-to-digital and digital-to-analogue converter respectively; ГСП (HCP) – hybrid co-processor; ПП (PP) – peripheral processor; МПУ (MPU) – microprocessor unit; ППК (SSS) – series and shunt switches; СК (NS) – network switch; КТУ (TPC) – three-phase commutator; СГП (SHP) – specialized hybrid processor

Цифровой подход используется для обеспечения всех информационно-управляющих функций, автоматизированного и автоматического управления параметрами и настройками моделируемого оборудования, коммутационными элементами и моделированием в целом, а также для отображения результатов моделирования и их обработки. Данный подход реализуется посредством цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования информации через необхо-

димые для этого программно-технические средства (рис. 3).

Итоговая структура многоуровневой информационно-управляющей системы ВМК РВ ЭЭС, а также время взаимодействия каждого из уровней, представлены на рис. 4 и 5.

Резюмируя вышесказанное, можно выделить основные существующие проблемы моделирования реальных ЭЭС и предлагаемые решения, которые кратко представлены в таблице.

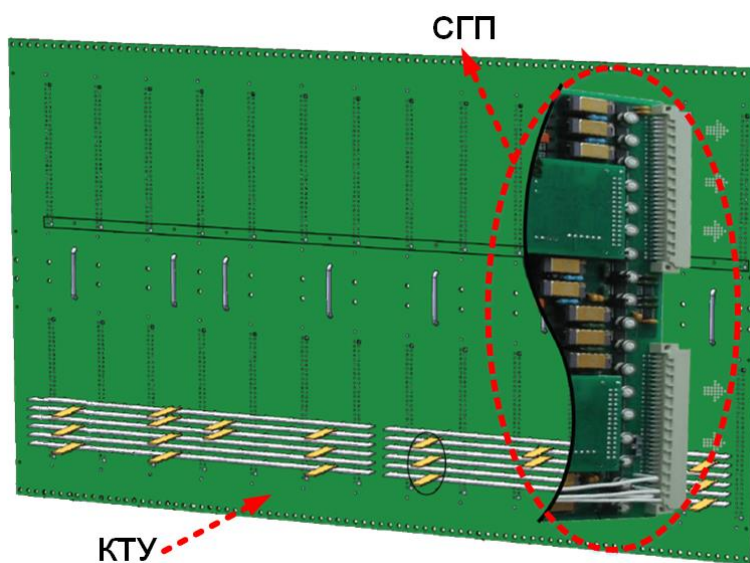


Рис. 2. Внешний вид кросс-платы КТУ для подключения СГП
Fig. 2. Design of the TPC cross-board for SHP connection

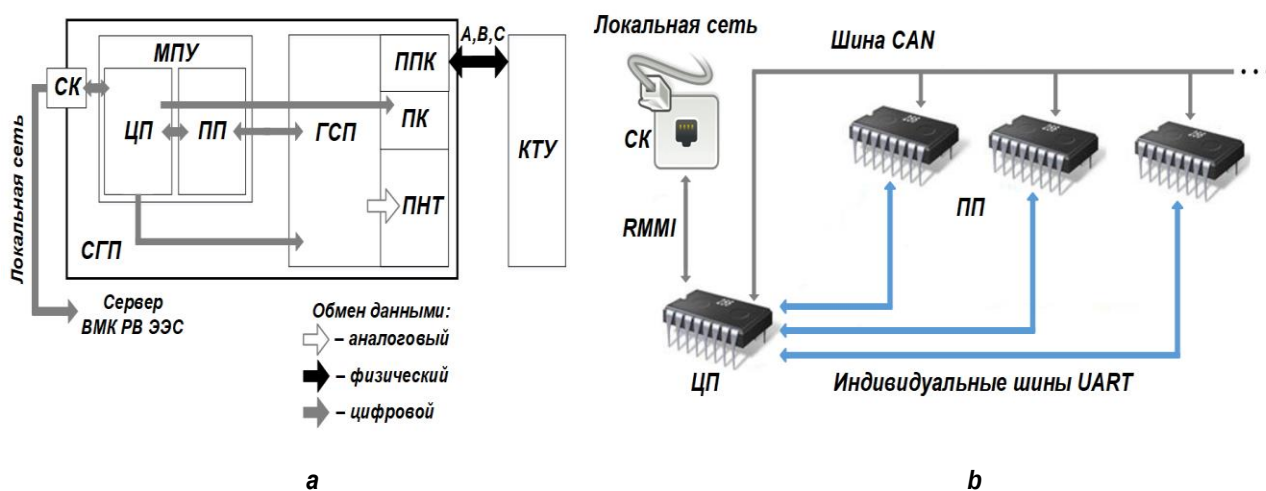


Рис. 3. Обобщенная структура построения СГП (а) и МПУ СГП (б):
 ПК – процессор коммутации; ПНТ – преобразователь напряжение-ток
 Fig. 3. Generalized structure of SHP (a) and SHP MPU (b): ПК (SP) – switching processor;
 ПНТ (VCC) – voltage-current converter

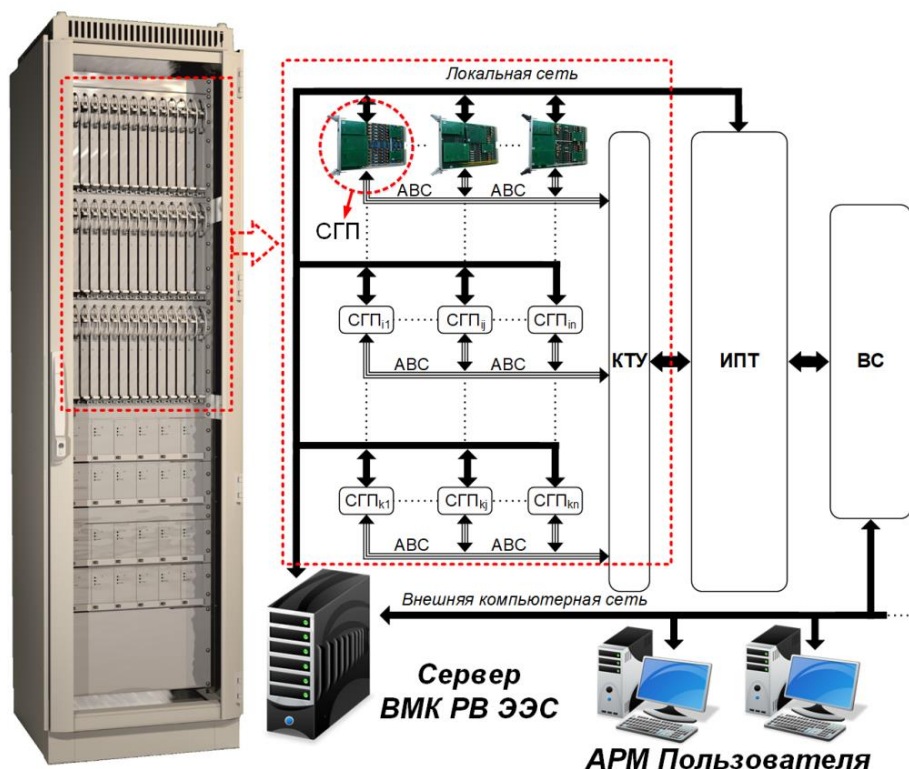


Рис. 4. Структурная схема экспериментального образца ВМК РВ ЭЭС: ИПТ – интерфейс программно-технический; ВС – внешние средства; АРМ – автоматизированное рабочее место
Fig. 4. Structural diagram of the experimental sample AMRTMC PS: ИПТ (HSI) – hardware-software interface; ВС – peripherals; АРМ (AWS) – automated workstation

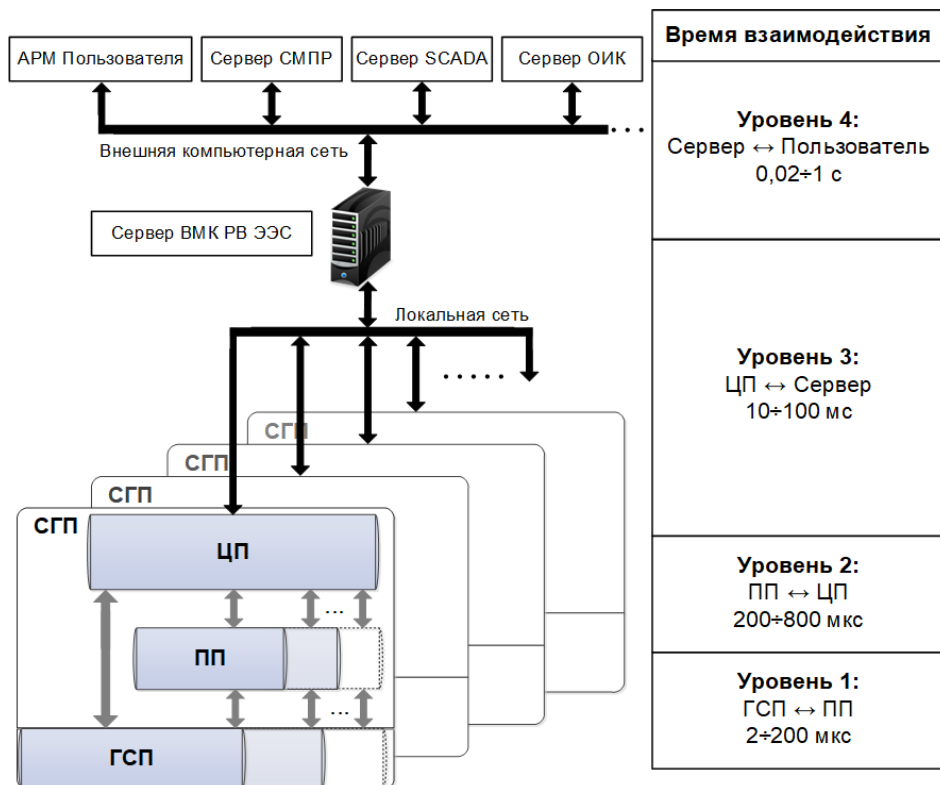


Рис. 5. Структура многоуровневой информационно-управляющей системы ВМК РВ ЭЭС
Fig. 5. Structure of the AMRTMC PS multilevel information-control system



**Существующие проблемы моделирования реальных ЭЭС
и их решение с помощью ВМК РВ ЭЭС**

Current issues of large-scale EPS simulation and their solution by means of the AMRTMC PS

№	Проблема	Решение
1	– декомпозиция процессов и режимов в ЭЭС; – упрощение математических моделей оборудования и ЭЭС в целом; – ограничение временного интервала моделирования; – неизвестная методическая ошибка численного интегрирования дифференциальных уравнений	Аналоговый уровень: применение метода параллельного непрерывного неявного интегрирования дифференциальных уравнений
2	– неадекватное воспроизведение процессов коммутации; – ограничение размера моделируемой ЭЭС	Физический уровень: взаимодействие моделируемого оборудования ЭЭС на физическом уровне путем преобразования математических переменных в физические сигналы
3	– ограничение оперативности информационно-управляющих свойств и возможностей	Цифровой уровень: применение цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования информации на основе современных IT-технологий

Результаты экспериментальных исследований

Свойства и возможности ВМК РВ ЭЭС позволяют интегрировать в комплекс математические модели любого элемента ЭЭС, учитывающие все ключевые особенности реализации конкретного оборудования или устройства, в том числе установок на базе ВИЭ. На данный момент ведутся работы по разработке универсальных моделей ВЭС и СЭС для ВМК РВ ЭЭС, описывающих различные типы подобных объектов, которые широко эксплуатируются в настоящее время. Реализация таких моделей предоставит возможность детально исследовать сами объекты РГ, однако для того чтобы полноценно исследовать влияние их интеграции в существующие ЭЭС, в первую очередь необходимо адекватно и подробно моделировать внешнюю ЭЭС, что в свою очередь позволит обеспечить высокий уровень надежности и эффективности решения задач проектирования, исследования и последующей эксплуатации ЭЭС с РГ.

Для демонстрации возможности по-

лучения с помощью ВМК РВ ЭЭС адекватной информации о процессах в оборудовании и ЭЭС в целом на данном этапе производилось сравнение результатов моделирования в тестовой схеме ЭЭС с данными, полученными с помощью всесторонне апробированного RTDS. Поскольку при моделировании схем незначительного объема проблемы, присущие цифровым ПАК при моделировании более сложных схем ЭЭС (накопление ошибки численного интегрирования, несинхронный обмен, потеря данных и др.) существенно не проявляются, следовательно, получаемые результаты моделирования должны совпадать с данными ВМК РВ ЭЭС, что подтвердит возможность его использования в качестве инструмента для детального и адекватного моделирования реальных ЭЭС с РГ.

В качестве исследуемой модели, воспроизводимой в средствах моделирования, принята трехфазная тестовая схема ЭЭС (рис. 6), которая содержит основные



элементы ЭЭС с идентичными математическими моделями и их параметрами в обоих комплексах: синхронные генераторы (Г-2, Г-3 и Г-4) и их системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и первичного двигателя; источник бесконечной мощности (Г-1); трансформаторы; линии электропередачи и нагрузки.

Оценка достоверности воспроизведения переходных процессов. Для анализа протекания переходных процессов в моделируемой тестовой схеме ЭЭС как в ВМК РВ ЭЭС, так и в RTDS был проведен ряд тестовых возмущений – в качестве примера в статье приведены следующие тестовые возмущения:

– однофазное замыкание фазы А (длительностью 0,2 с) на шинах 220 кВ ТЭЦ – в данном случае проведено сравнение тока, протекающего по линии ВЛ-207, и напряжения, на противоположном конце ВЛ-207 у шин 220 кВ подстанции 2 для поврежденной фазы (рис. 7);

– трехфазное КЗ (длительностью 0,2 с) на шинах 110 кВ подстанции 3 – сравниваются токи фазы А генераторов Г-3 и Г-4, расположенных на ГРЭС (рис. 8).

Полученные осциллограммы демонстрируют идентичные переходные процессы.

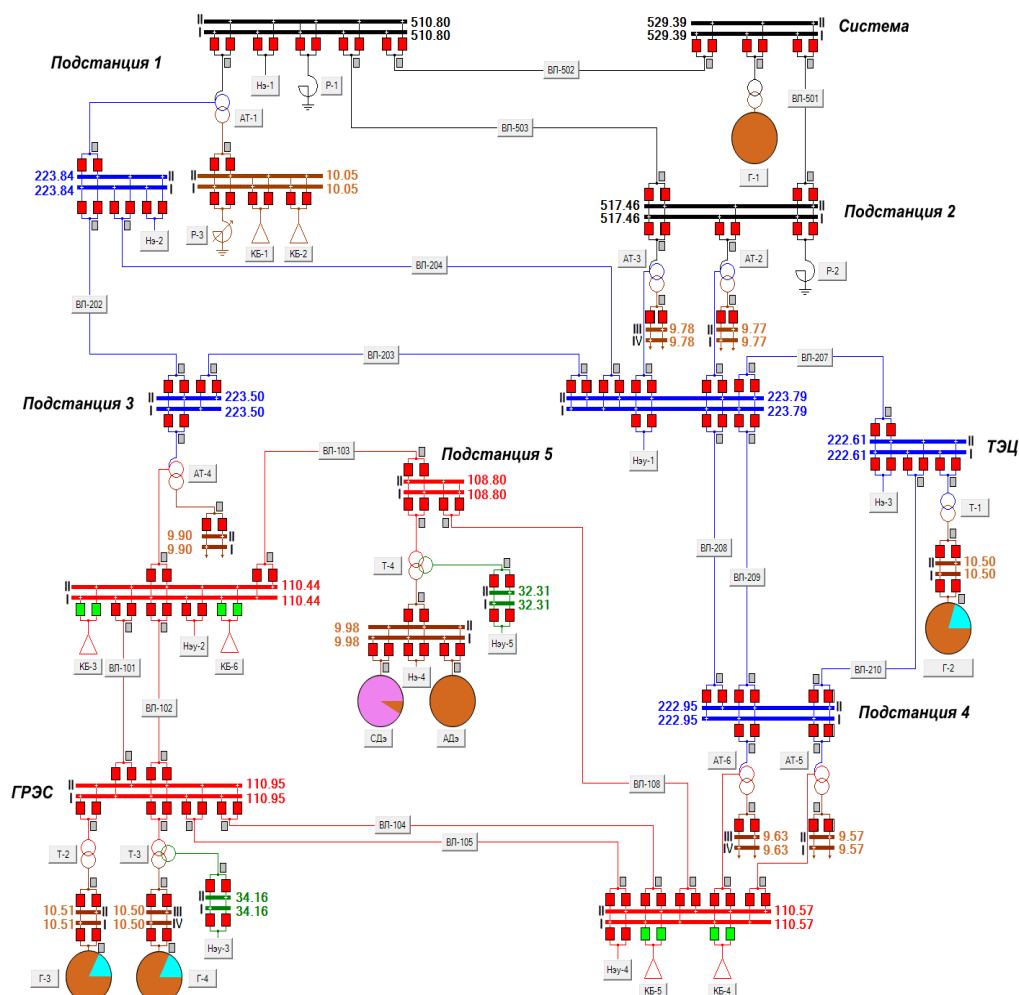


Рис. 6. Моделируемая тестовая схема ЭЭС (однолинейный вид в ВМК РВ ЭЭС): Г – генераторы; СД, АД – синхронный и асинхронный двигатели; АТ – автотрансформаторы; Т – трансформаторы; ВЛ – линии электропередачи; Н – статические нагрузки; КБ – конденсаторные батареи; Р – реакторы
Fig. 6. Simulated test circuit of EPS (single-line view in the AMRTMC PS): Г (G) – generators; СД, АД (SM, IM) – synchronous and induction machines; АТ – autotransformers; Т – transformers; ВЛ (TL) – transmission lines; Н (SL) – static loads; КБ (CB) – capacitor banks; Р (R) – reactors

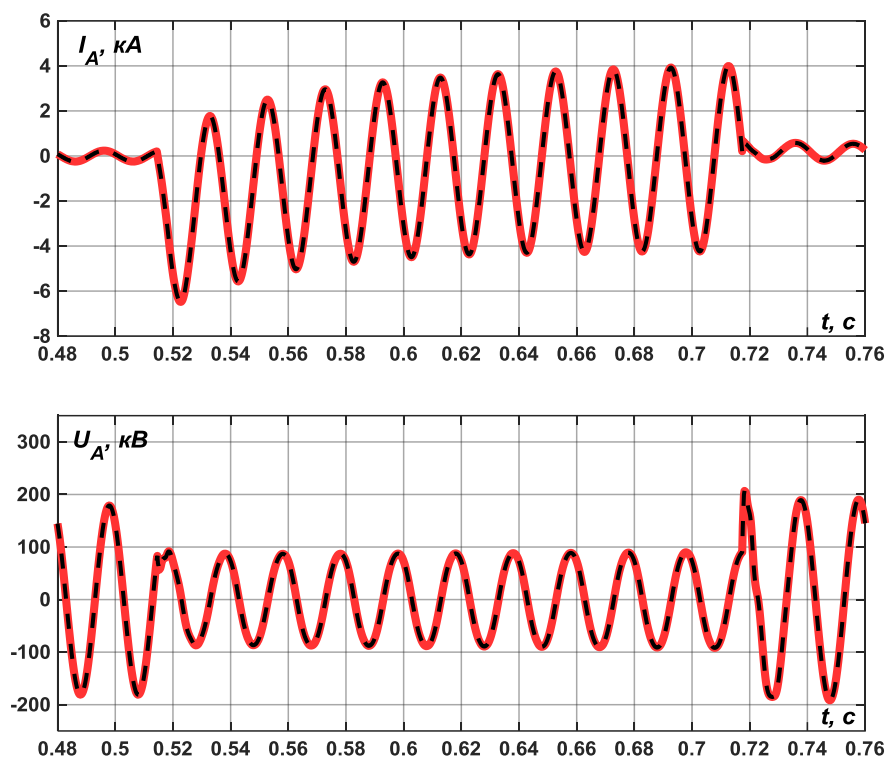


Рис. 7. Сравнение осциллограмм тока и напряжения при однофазном замыкании фазы A на шинах 220 кВ ТЭЦ
Fig. 7. Comparison of current and voltage oscillograms for the case of a single-phase fault A on 220 kV TPP buses

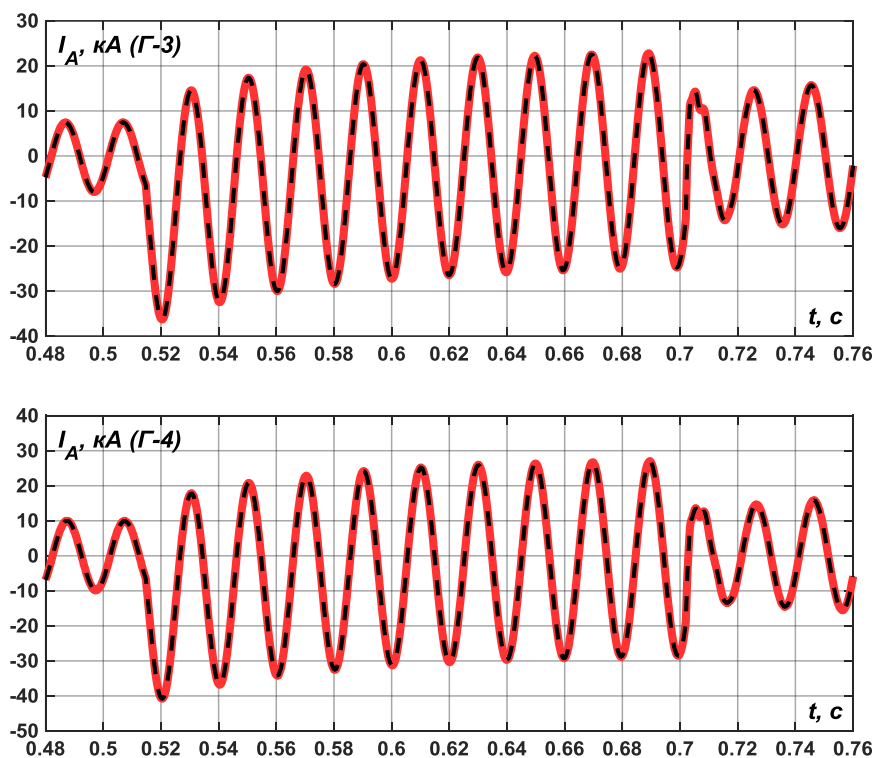


Рис. 8. Сравнение осциллограмм тока фазы A генераторов Г-3 и Г-4 при трехфазном КЗ на шинах 110 кВ подстанции 3
Fig. 8. Comparison of current oscillograms of the A phase for generators G-3 and G-4 for the case of a three-phase short circuit on the 110 kV buses of the substation 3

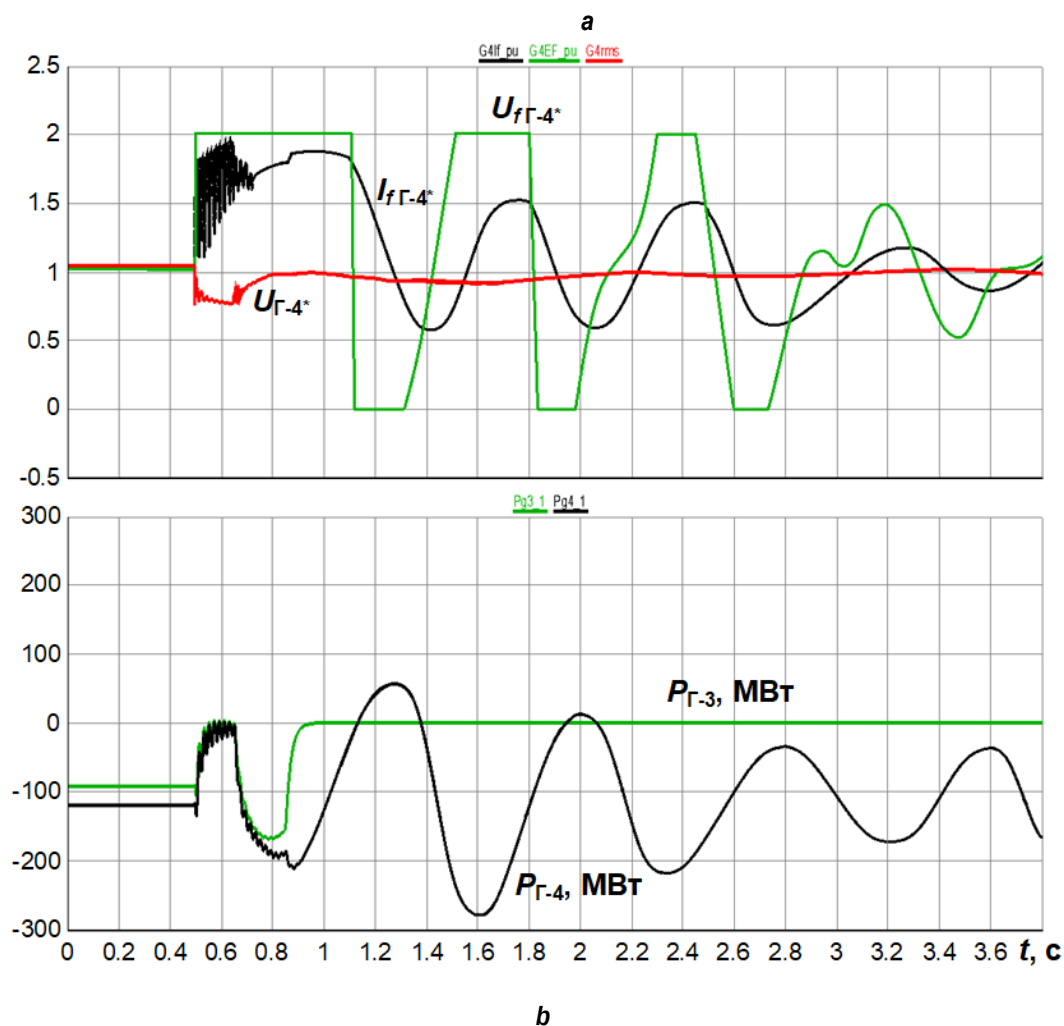
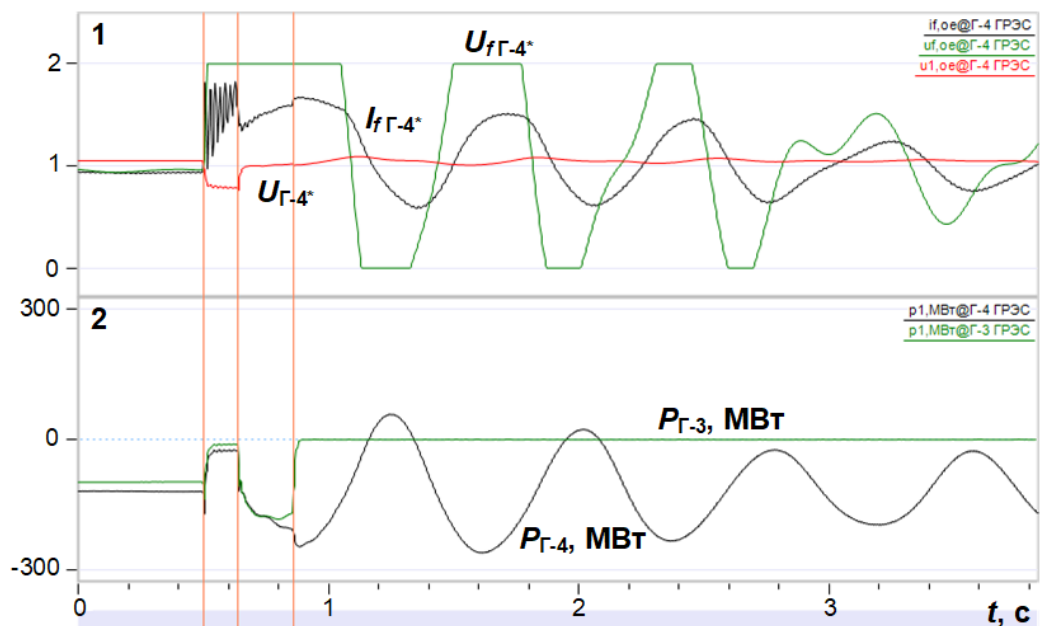
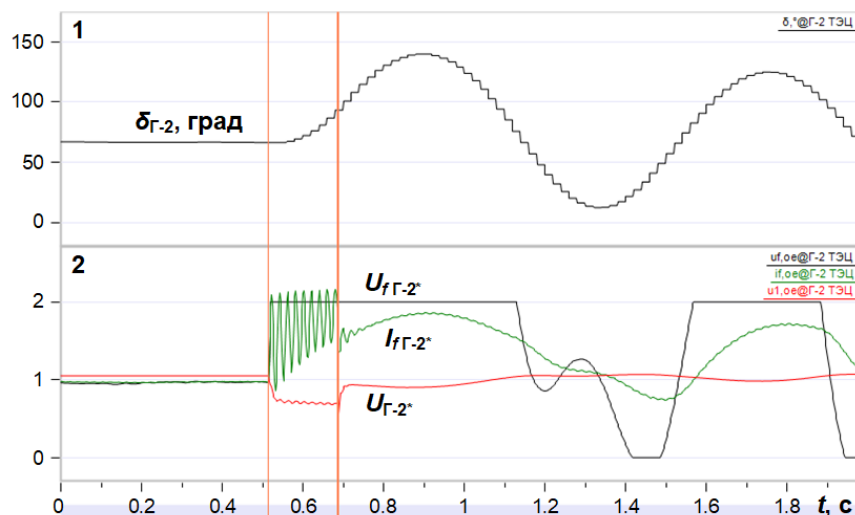
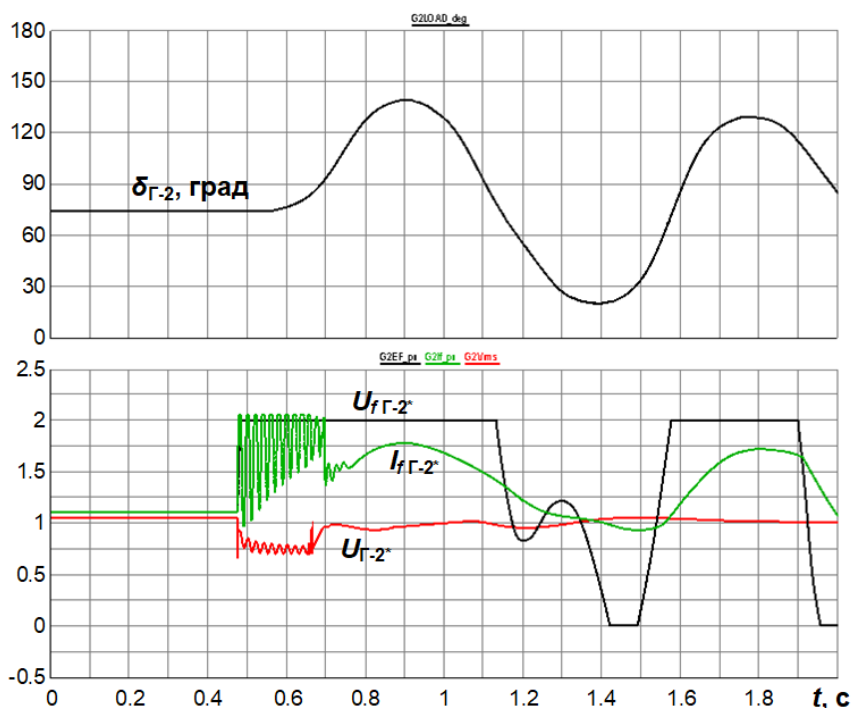


Рис. 9. Осциллограммы работы АРВ синхронного генератора при двухфазном КЗ вблизи шин 110 кВ ГРЭС, полученные с помощью ВМК РВ ЭЭС (а) и RTDS (б)
Fig. 9. Oscillograms of the synchronous generator automatic excitation control operation for the case of two-phase short circuit close to the buses of 110 kV hydro power plant obtained by means of AMRTMC PS (a) and RTDS (b)



a



b

Рис. 10. Осциллограммы работы АРВ синхронного генератора при трехфазном КЗ вблизи шин 220 кВ ТЭЦ, полученные с помощью БМК РВ ЭЭС (а) и RTDS (b)
Fig. 10. Oscillograms of the synchronous generator automatic excitation control operation for the case of the three-phase short circuit close to the 220 kV TPP buses obtained by means of AMRTMC PS (a) and RTDS (b)

Оценка достоверности функционирования математических моделей АРВ. Исследование работы математиче-

ских моделей АРВ синхронных генераторов в обоих комплексах производилось путем реализации тестовых возмущений¹.

¹СТО 59012820.29.160.20.001-2012. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов. Введ. 03.04.2012; изм. 14.07.2015. М.: Изд-во стандартов. 2012, 150 с. / STO 59012820.29.160.20.001-2012. Requirements for excitation systems and automated power system stabilizers of synchronous generators. Introduced 3 April 2012; amended 14 July 2015. Moscow: Standards Publ., 2012, 150 p.



В статье представлено сравнение действия АРВ при следующих тестовых возмущениях:

– двухфазное КЗ (длительностью 0,15 с) вблизи шин 110 кВ ГРЭС с отключением линии ВЛ-104 и отключением Г-3 (рис. 9) – в данном эксперименте для сохранения устойчивости через 0,35 секунды с момента возникновения короткого замыкания должна

срабатывать противоаварийная автоматика, действующая на отключение Г-3 ГРЭС; – трехфазное КЗ (длительностью 0,18 с) вблизи шин 220 кВ ТЭЦ с отключением линии ВЛ-207 без нарушения динамической устойчивости (рис. 10).

Анализ приведенных осциллограмм показывает идентичный характер работы математических моделей АРВ во всех случаях.

Заключение

Внедрение объектов РГ является одним из перспективных направлений развития современной электроэнергетики. Однако использование подобных установок сопряжено с рядом проблем, весьма существенных как для самих объектов РГ, так и для ЭЭС, в которые они внедряются. Для всестороннего исследования и решения этих проблем необходимо проведение детального моделирования реальных ЭЭС, которое невозможно осуществить в рамках существующих средств моделирования, что связано с неизвестной достоверностью результатов, получаемых в них из-за применяемых упрощений и ограничений. В статье

предложено использовать ВМК РВ ЭЭС для моделирования реальных ЭЭС с РГ, который, в силу своих свойств и возможностей, позволит обеспечить получение полной и достоверной информации о нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессах в ЭЭС с РГ, необходимой для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с РГ. Возможность получения такой информации подтверждена экспериментальным путем – производилось сравнение результатов моделирования небольшой тестовой схемы ЭЭС, полученных с помощью ВМК РВ ЭЭС и RTDS.

Библиографический список

1. Renewables 2018 Global Status Report [Электронный источник]. URL: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_-1.pdf (02.10.2018).
2. Кучеров Ю.Н., Березовский П.К., Федоров Ю.Г., Губарева Ю.В. Исследовательский комитет С6 «Системы распределения электроэнергии и распределенная генерация» // Энергетика за рубежом. 2014. № 1-2. С. 161–180.
3. Нудельман Г., Онисова О. Релейная защита и автоматика в условиях развития малой распределенной энергетики // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 4 (25). С. 106–114.
4. Telukunta V., Pradhan J., Agrawal A., Singh M., Srivani S.G. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2017. Vol. 3. No. 4. P. 365–379. DOI: 10.17775/CSEE-JPES.2017.00030
5. Atwa Y.M., El-Saadany E.F. Reliability Evaluation for Distribution System with Renewable Distributed Generation during Islanded Mode of Operation. IEEE Transactions on Power Systems. 2009. Vol. 24. No. 2. P. 572–581. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2016458
6. He L., Liu C.C., Pitto A., Cirio D. Distance protection of AC grid with HVDC-connected offshore wind generators. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. Vol. 29. No. 2. P. 493–501. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2271761
7. Muljadi E., Zhang Y.C., Gevorgian V., Kosterev D. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7855542
8. Carreras B.A., Newman D.E., Dobson I. Does size matter? Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2014. Vol. 24. No. 2. P. 1–7. DOI: 10.1063/1.4868393
9. Watson N., Arrillage J. Power systems electromagnetic transients simulation. London, UK: The Institution of Engineering and Technology. 2003. P. 351–358.
10. Butcher J. C. Numerical methods for ordinary differential equations: early days in the birth of numerical analysis. 2nd ed., Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons. 2008. P. 31–40.
11. Хайпер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и алгебродифференциальные задачи / пер. с англ. М.: Мир,



1999. 612 с.

12. Бабушка И., Витасек Э., Прагер М. Численные процессы решения дифференциальных уравнений / пер. с англ. М.: Мир, 1969. 368 с.

13. Холл Д., Уатт Д. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / пер. с англ. М.: Мир, 1979. 312 с.

14. Герасимов А.С., Есипович А.Х., Смирнов А.Н. Об опыте верификации цифровых и физических моделей энергосистем // Электрические станции. 2010. № 11. С. 11–19.

15. Kosterev D., Taylor C., Mittelstadt W. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage. IEEE Transactions on Power Systems. 1999. Vol. 14. No. 3. P. 967–979. DOI: 10.1109/59.780909

16. Chen Y., Dinavahi V. Multi-FPGA digital hardware design for detailed large-scale real-time electromagnetic transient simulation of power systems. IET Generation, Transmission & Distribution. 2013. Vol. 7. No. 5. P. 451–463. DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0374

17. Liang Y., Lin X., Gole A.M., Yu M. Improved coherency-based wide-band equivalents for real-time digital simulators. IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Vol. 26. No. 3. P. 1410–1417. DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2085456

18. Shu D., Xie X., Jiang Q., Huang Q., Zhang C. A novel interfacing technique for distributed hybrid simulations combining EMT and transient stability models. IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33. No. 1. P. 130–140. DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2690145

19. Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. 2017. № 5 (752). С. 18–27.

20. Гусев А.С., Хрущев Ю.В., Гуринов С.В., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем // Электричество. 2009. № 12. С. 5–8.

21. Andreev M.V., Sulaymanov A.O. Platform based on Hybrid Real-Time Power System Simulator for development and research of Intelligent Power Systems with active-adaptive networks. IEEE Eindhoven PowerTech. 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232239

22. Andreev M., Gusev A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Askarov A., Bems J., Kralik T. Hybrid Real-Time Simulator of Large-Scale Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems. (in print) DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2876668

References

1. Renewables 2018 Global Status Report. Available at: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_-1.pdf (accessed 2 October 2018).

2. Kuchеров Ю.Н., Березовский П.К., Федоров Ю.Г., Губарева Ю.В. *Sistemy raspredeleniya elektroenergii i raspredelennaya generatsiya* [Power distribution systems and distributed generation]. *Energetika za rubezhom* [Foreign Power Engineering], 2014, no. 1-2, pp. 161–180. (In Russian)

3. Nudel'man G., Onisova O. Relay protection and automation under development of small distributed energy. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric Power. Transmission and Distribution], 2014, no. 4 (25), pp. 106–114. (In Russian)

4. Telukunta V., Pradhan J., Agrawal A., Singh M., Srivani S.G. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, vol. 3, no. 4, pp. 365–379. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2017.00030

5. Atwa Y.M., El-Saadany E.F. Reliability Evaluation for Distribution System with Renewable Distributed Generation during Islanded Mode of Operation. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, vol. 24, no. 2, pp. 572–581. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2016458

6. He L., Liu C.C., Pitto A., Cirio D. Distance protection of AC grid with HVDC-connected offshore wind generators. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, vol. 29, no. 2, pp. 493–501. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2271761

7. Muljadi E., Zhang Y.C., Gevorgian V., Kosterev D. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7855542

8. Carreras B.A., Newman D.E., Dobson I. Does size matter? Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2014, vol. 24, no. 2, pp. 1–7. DOI: 10.1063/1.4868393

9. Watson N., Arrillage J. Power systems electromagnetic transients simulation. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2003, pp. 351–358.

10. Butcher J. C. Numerical methods for ordinary differential equations: early days in the birth of numerical analysis. 2nd ed., Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008, pp. 31–40.

11. Hairer E., Wanner G. *Reshenie obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii. Zhestkie i algebro-differentsial'nye zadachi* [Solving ordinary differential equations. Stiff and differential algebraic problems]. Moscow: Mir, 1999, 612 p. (In Russian)

12. Babuska I., Prager M., Vitasek E. *Chislennyye protsessy resheniya differentsial'nykh uravnenii* [Numerical processes in differential equations solution]. Moscow: Mir, 1969, 368 p. (In Russian)

13. Hall D., Watt D. *Sovremennyye chislennyye metody resheniya obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii* [Modern numerical methods for solving ordinary differential equations]. Moscow: Mir, 1979, 312 p. (In Russian)

14. Gerasimov A.S., Esipovich A.Kh., Smirnov A.N. *Ob opyte verifikatsii tsifrovyykh i fizicheskikh modelei ener-*



gosistem [On validation experience of digital and physical models of power systems]. *Elektricheskie stantsii* [Power Stations], 2010, no. 11, pp. 11–19. (In Russian)

15. Kosterev D., Taylor C., Mittelstadt W. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, vol. 14, no. 3, pp. 967–979. DOI: 10.1109/59.780909

16. Chen Y., Dinavahi V. Multi-FPGA digital hardware design for detailed large-scale real-time electromagnetic transient simulation of power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2013, vol. 7, no. 5, pp. 451–463. DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0374

17. Liang Y., Lin X., Gole A.M., Yu M. Improved coherency-based wide-band equivalents for real-time digital simulators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 1410–1417. DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2085456

18. Shu D., Xie X., Jiang Q., Huang Q., Zhang C. A novel interfacing technique for distributed hybrid simulations combining EMT and transient stability models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, vol. 33, no. 1, pp.

130–140. DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2690145

19. Andreev M.V., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Sulaimanov A.O., Suvorov A.A., Ruban N.Yu., Ufa R.A. Concept and basic structure of the all-mode modeling complex. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas industry], 2017, no. 5 (752), pp. 18–27. (In Russian)

20. Gusev A.S., Khrushchev Yu.V., Gurin S.V., Svechkarov S.V., Plodistyi I.L. The all-mode real-time modeling complex of electric power systems. *Elektrichestvo* [Electricity], 2009, no. 12, pp. 5–8. (In Russian)

21. Andreev M.V., Sulaymanov A.O. Platform based on Hybrid Real-Time Power System Simulator for development and research of Intelligent Power Systems with active-adaptive networks. *IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232239

22. Andreev M., Gusev A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Askarov A., Bems J., Kralik T. Hybrid Real-Time Simulator of Large-Scale Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. (in print) DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2876668

Критерии авторства

Аскаров А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В. производили сравнение результатов моделирования небольшой тестовой схемы электроэнергетических систем, заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev M.V. compared the simulation results of a small test circuit of electric power systems, 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аскаров Алишер Бахрамжонович, аспирант, e-mail: aba7@tpu.ru

Суворов Алексей Александрович, ассистент, e-mail: suvorovaa@tpu.ru

Андреев Михаил Владимирович, кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Моделирование электроэнергетических систем» Инженерной школы энергетики, e-mail: andreevmv@tpu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alisher B. Askarov, Postgraduate student, e-mail: aba7@tpu.ru

Aleksey A. Suvorov, Assistant, e-mail: suvorovaa@tpu.ru

Mikhail V. Andreev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory "Electric Power System Modeling" of the Engineering school of power engineering, e-mail: andreevmv@tpu.ru



Методика определения электрических параметров с учетом волновой теории передачи электрической энергии

© Г.А. Большанин

Братский государственный университет, г. Братск, Российская Федерация

Резюме: Предложена методика прогнозирования распределения гармонических составляющих напряжений и токов в линиях электропередачи трехпроводного исполнения, работающих в режиме передачи электрической энергии потребителю. Показано, что передача электрической энергии потребителю обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля, а скорость передачи этой энергии определяется первичными параметрами соответствующей линии электропередачи. Скорость передачи электрической энергии по линейным проводам линии электропередачи определяется скоростью распространения волн электромагнитного поля в материальной среде. Показано, что длина волны электромагнитного поля и скорость его распространения по линейным проводам линии электропередачи заметно меньше, чем длина волны и скорость распространения этого поля в вакууме. Приведен пример расчета и визуального определения длины волны электромагнитного поля в линейных проводах линии электропередачи трехпроводного исполнения. Представлена схема распространения амплитудных значений волн электромагнитного поля по линейному проводу линии электропередачи трехпроводного исполнения. Передача электрической энергии по линии электропередачи трехпроводного исполнения представляет собой сложный колебательный процесс. Это подтверждено графической интерпретацией распределения фазного напряжения вдоль линии электропередачи трехпроводного исполнения. Отмечен тот факт, что передача электрической энергии по линейному проводу однородного участка линии электропередачи трехпроводного исполнения может быть представлена как распространение результирующей волны, полученной в итоге наложения трех падающих и трех отраженных волн электромагнитного поля. Представлены иллюстрации амплитудно-частотных характеристик по напряжению и току.

Ключевые слова: волны электромагнитного поля, первичные параметры, длина волны, фазовая скорость, фазное напряжение, линейный ток

Информация о статье: Дата поступления 01 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 18 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Большанин Г.А. Методика определения электрических параметров с учетом волновой теории передачи электрической энергии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):90–100. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-90-100.

Determination methods of electric parameters considering the electric energy wave transmission theory

Georgy A. Bolshanin

Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation

Abstract: The article proposes methods predicting the distribution of harmonic components of voltages and currents in three-wire power transmission lines operating in the mode of electric energy transmission to consumers. It is shown that the transmission of electric energy to consumers is provided by three pairs of waves of an electromagnetic field, while this energy transmission rate is determined by the primary parameters of the corresponding power transmission line. The electrical energy transmission rate through linear wires of the power transmission line is determined by the propagation velocity of electromagnetic field waves in a material medium. It is shown that the wavelength of the electromagnetic field and its propagation velocity along the linear wires of the power transmission line are much less than the wavelength and the propagation velocity of this field in vacuum. An example of calculation and visual determination of the electromagnetic field wavelength in linear wires of a three-wire power transmission line is given. A propagation diagram of electromagnetic field wave amplitude values along a linear wire of a three-wire transmission line is presented. Electrical energy transmission through the three-wire power transmission line is a complex oscillation process. This is confirmed by a graphical interpretation of phase voltage distribution along the three-wire power transmission line. It is noted that electrical energy transmission through a linear wire of a homogeneous section of the three-wire power transmission line can be represented as a propagation of the resultant wave obtained due to the superposition of three incident and three reflected waves of the electromagnetic field. Illustrations of amplitude-frequency characteristics for voltage and current are presented.



Keywords: electromagnetic field waves, primary parameters, wavelength, phase velocity, phase voltage, linear current
Information about the article: Received December 01, 2018; accepted for publication January 18, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Bolshanin G.A. Determination methods of electric parameters considering the electric energy wave transmission theory. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):90–100. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-90-100.

Введение

Традиционно электрическая энергия доставляется потребителям линиями электропередачи (ЛЭП). Основу ЛЭП составляют провода, изготовленные из проводящих материалов – металлов. Чаще всего это – сталь, алюминий, медь и т.п. При небольших по величине токах эти материалы обладают неявно выраженной нелинейностью. Для токоведущих частей ЛЭП границы линейности и нелинейности определены величинами допустимых токов, указанных в соответствующих справочных материалах^{1,2}. В этих и других литературных источниках не рекомендуется при эксплуатации ЛЭП превышать допустимые токи. Таким образом, токоведущие части линий электропередачи эксплуатируются в основном в линейной области вольтамперных характеристик материалов, из которых изготовлены линейные провода ЛЭП. Передача электрической энергии по проводам ЛЭП осуществляется вследствие распространения электромагнитного поля в линейной среде [1]. Известно, что в линейной среде электромагнитное поле распространяется по гармоническим законам³. Но тогда и электрическая энергия по проводам ЛЭП распространяется по подобным законам.

В материальной среде, каковыми являются провода ЛЭП, скорость распространения электромагнитного поля значительно меньше 300000 км/с. Следовательно, и длина волны на частоте основной гармонической составляющей электромагнитного поля, распространяемого по линейным проводам ЛЭП, меньше 6000 км. Исследования показали, что длина волны электромагнитного поля по материальной среде зависит от величины коэффициента фазы [2].

Передача электрической энергии потребителю по однородному участку трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля [2–4]. Электрическая энергия от начала этого участка передается тремя падающими волнами электромагнитного поля. Затем часть энергии передается дальше потребителю, а другая часть энергии отраженными волнами электромагнитного поля возвращается в начало анализируемого участка ЛЭП. Этот процесс наиболее полно иллюстрируется уравнениями распределения линейных токов на частоте n -й гармонической составляющей вдоль однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения:

$$I_A = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{Z_{cAi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{Z_{cAi}} + \frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{Z_{cABi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{Z_{cABi}} + \frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{Z_{cCAi}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{Z_{cCAi}} \right) \right]; \quad (1)$$

¹Электротехнический справочник в 4-х т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). 9-е изд., стер. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 964 с. / Electrotechnical reference book in 4 volumes. Vol. 3. Production, transmission and distribution of electrical energy / Under total edition of V.G. Gerasimov et al. (Chief Editor A.I. Popov). 9th edition, stereotyped. M.: MEI Publ., 2004. 964 p.

²Справочник по электроснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / Под общ. ред. С.И. Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цырука. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 745 с. / Handbook of Electrical Energy Supply and Electrical Equipment of Industrial Enterprises and Public Buildings / Under total edition of S.I. Gamazin, B.I. Kudrin, S.A. Tsyruk. M.: MEI Publ., 2010. 745 p.

³Физический энциклопедический словарь. Т. 5. / Гл. ред. Б.А. Введенский, Б.М. Вул. М.: Советская энциклопедия, 1966. 576 с. / Physical encyclopedic dictionary. Vol. 5. / Chief Editor B.A. Vvedensky, B.M. Vul. M.: Soviet Encyclopedia, 1966. 576 p.



$$\dot{I}_B = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBi}} + \frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cABi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cABi}} + \frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\dot{I}_C = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{A_{C2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCi}} - \frac{A_{C(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCi}} + \frac{A_{A2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCAi}} - \frac{A_{A(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cCAi}} + \frac{A_{B2i} e^{-\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} - \frac{A_{B(2i-1)} e^{\gamma_i l}}{\underline{Z}_{cBCi}} \right) \right], \quad (3)$$

где A_{A2i} и $A_{A(2i-1)}$, A_{B2i} и $A_{B(2i-1)}$, A_{C2i} и $A_{C(2i-1)}$ – пофазные постоянные интегрирования, характеризующие отраженные и падающие волны i -й пары волн электромагнитного поля; γ_i – постоянная распространения i -й пары волн электромагнитного поля; $\underline{Z}_{cAi}$, $\underline{Z}_{cBi}$ и $\underline{Z}_{cCi}$ – собственные волновые сопротивления линейных проводов A , B и C i -й пары волн электромагнитного поля; $\underline{Z}_{cABi}$, $\underline{Z}_{cBCi}$ и $\underline{Z}_{cCAi}$ – взаимные волновые сопротивления между линейными проводами i -й пары волн электромагнитного поля; l – протяженность рассматриваемого участка ЛЭП.

Получается, что действительно в передаче электрической энергии по каждому линейному проводу участвует три пары волн, обусловленных собственными параметрами каждого линейного провода, и шесть пар волн электромагнитного поля, наведенного от соседних проводов, обусловленных электромагнитными связями между линейными проводами.

Схема распределения амплитудных значений первой (условно) пары волн электромагнитного поля вдоль линейного провода A однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, протяженностью l_Σ на частоте n -й гармонической составляющей, изображена на рис. 1 [2]. Здесь видно, что каждая пара волн электромагнитного поля присутствует во всех трех линейных проводах. Поэтому в одном линейном проводе однородного участка трехпроводной ЛЭП от каждой пары волн электромагнитного поля имеют место три падающих и три отраженных волны: одна падающая и одна отраженная от собственных параметров этого провода, две падающих и две отраженных через электромагнитные связи от соседних проводов.

Итак, первые пары волн, как и вторые, и третьи, в каждом линейном проводе делятся в свою очередь на три пары: одна пара собственных и две пары взаимных. Часть электрической энергии, переносимая каждой падающей волной от начала анализируемого однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения к ее концу, передается далее потребителю. Другая часть электрической энергии отраженными волнами – одной собственной и двумя взаимными – передается обратно к концу анализируемого участка ЛЭП.

В качестве потребителя электрической энергии следует принимать ту часть электроэнергетической системы, которая расположена за пределами конца рассматриваемого участка ЛЭП.

Передаваемая потребителю по линейному проводу A электрическая энергия на рис. 1 характеризуется током $\dot{I}_{2An}^{(1)}$, определяемым суммой от каждой падающей волны:

$$\dot{I}_{2An}^{(1)} = \dot{I}_{2An}^{(1A)} + \dot{I}_{2An}^{(1B)} + \dot{I}_{2An}^{(1C)},$$

где $\dot{I}_{2An}^{(1A)}$, $\dot{I}_{2An}^{(1B)}$ и $\dot{I}_{2An}^{(1C)}$ – токи от первых пар волн в линейном проводе A от собственных параметров линейных проводов A , B и C , соответственно, на частоте n -й гармонической составляющей.

Это только от первой пары волн электромагнитного поля. От второй и третьей пар волн по линейному проводу A потребителю тоже передается определенная часть электрической энергии, характеризующаяся токами:



$$\dot{I}_{2An}^{(2)} = \dot{I}_{2An}^{(2A)} + \dot{I}_{2An}^{(2B)} + \dot{I}_{2An}^{(2C)};$$

$$\dot{I}_{2An}^{(3)} = \dot{I}_{2An}^{(3A)} + \dot{I}_{2An}^{(3B)} + \dot{I}_{2An}^{(3C)},$$

где $\dot{I}_{2An}^{(2A)}$, $\dot{I}_{2An}^{(2B)}$ и $\dot{I}_{2An}^{(2C)}$ – токи от второй пары волн в линейном проводе А от собственных параметров линейных проводов А, В и С; $\dot{I}_{2An}^{(3A)}$, $\dot{I}_{2An}^{(3B)}$ и $\dot{I}_{2An}^{(3C)}$ – токи от третьей пары волн в линейном проводе А от собственных параметров линейных проводов А, В и С на частоте n -й гармонической составляющей.

Весь линейный ток в линейном проводе А (потребителю) определяется суммой:

$$\dot{I}_{2An} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{2An}^{(1)} + \dot{I}_{2An}^{(2)} + \dot{I}_{2An}^{(3)}).$$

или:

$$\dot{I}_{2An} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{A_{A2in}}{Z_{cAin}} + \frac{A_{B2in}}{Z_{cABin}} + \frac{A_{C2in}}{Z_{cCAin}} \right) e^{-\gamma_{in} l_{\Sigma}} - \left(\frac{A_{A(2i-1)n}}{Z_{cAin}} + \frac{A_{B(2i-1)n}}{Z_{cABin}} + \frac{A_{C(2i-1)n}}{Z_{cCAin}} \right) e^{\gamma_{in} l_{\Sigma}} \right]. \quad (4)$$

Численные значения постоянных интегрирования A_{A2in} и $A_{A(2i-1)n}$ рассчитываются по методике, изложенной в [2].

Все это справедливо для наблюдателя, находящегося в начале исследуемого участка линии электропередачи.

Аналогичные расчеты можно провести и для наблюдателя, находящегося в конце анализируемого участка трехпроводной ЛЭП, взяв за основу для расчета уравнения:

$$\dot{U}_{An} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (B_{A(2i-1)n} e^{-\gamma_{in} y} + B_{A2in} e^{\gamma_{in} y}); \quad (5)$$

$$\dot{U}_{Bn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (B_{B(2i-1)n} e^{-\gamma_{in} y} + B_{B2in} e^{\gamma_{in} y}); \quad (6)$$

$$\dot{U}_{Cn} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (B_{C(2i-1)n} e^{-\gamma_{in} y} + B_{C2in} e^{\gamma_{in} y}), \quad (7)$$

где y – расстояние от конца анализируемого участка ЛЭП до места, где необходимо определить напряжение; B_{A2i} и $B_{A(2i-1)}$, B_{B2i} и $B_{B(2i-1)}$, B_{C2i} и $B_{C(2i-1)}$ – постоянные интегрирования.

Уравнения распределения линейных токов от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения аналогичны уравнениям (1)–(3), для линии А имеют вид:

$$\dot{I}_A = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{B_{A2i} e^{-\gamma_{i,y}}}{Z_{cAi}} - \frac{B_{A(2i-1)} e^{\gamma_{i,y}}}{Z_{cAi}} + \frac{B_{B2i} e^{-\gamma_{i,y}}}{Z_{cABi}} - \frac{B_{B(2i-1)} e^{\gamma_{i,y}}}{Z_{cABi}} + \frac{B_{C2i} e^{-\gamma_{i,y}}}{Z_{cCAi}} - \frac{B_{C(2i-1)} e^{\gamma_{i,y}}}{Z_{cCAi}} \right) \right]. \quad (8)$$

Из уравнений (4) и (8) видно, что на формирование каждого линейного тока оказывают влияние токи соседних линий. Соседние линии оказывают влияние и на формирование фазных

напряжений через постоянные интегрирования A_{A2i} и $A_{A(2i-1)}$, A_{B2i} и $A_{B(2i-1)}$, A_{C2i} и $A_{C(2i-1)}$ или B_{A2i} и $B_{A(2i-1)}$, B_{B2i} и $B_{B(2i-1)}$, B_{C2i} и $B_{C(2i-1)}$.

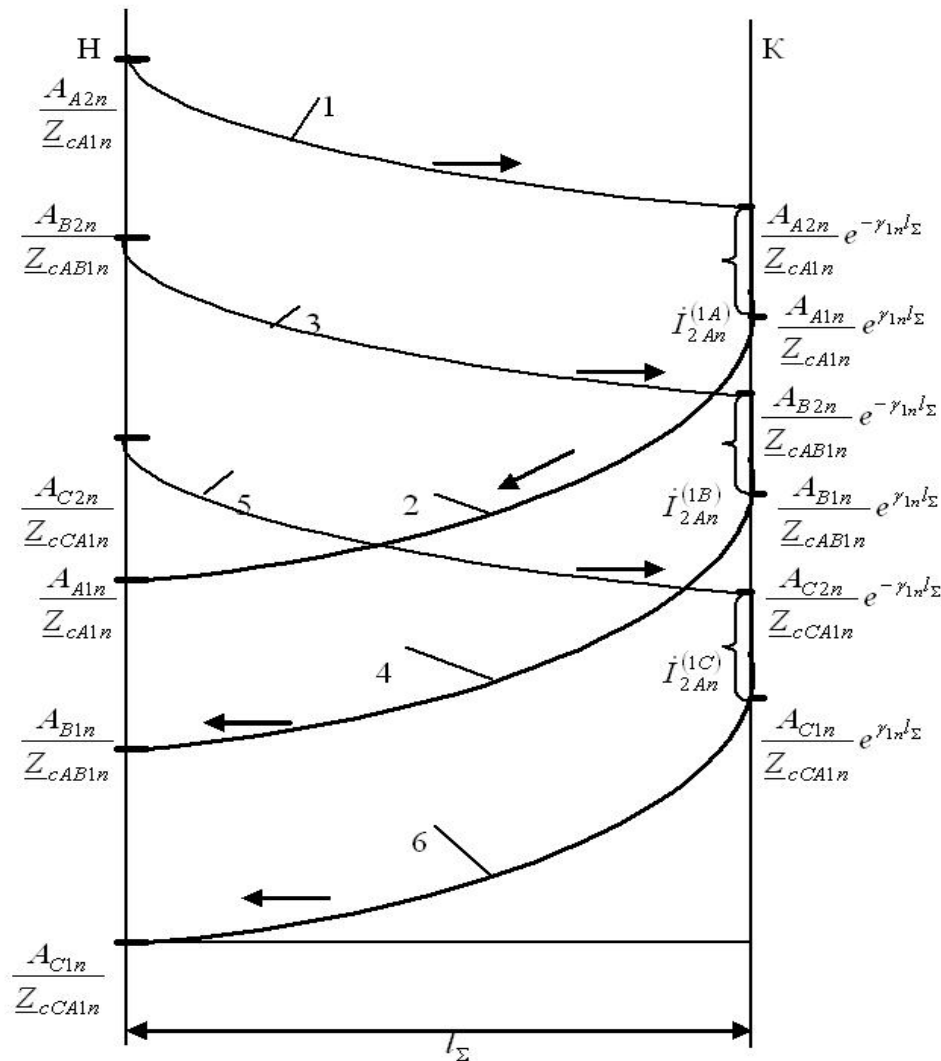


Рис. 1. Схема распределения амплитудных значений первых пар падающих и отраженных волн электромагнитного поля по линейному проводу А однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения: 1 – собственная падающая волна; 2 – собственная отраженная волна; 3 – наведенная падающая волна от линейного провода В; 4 – наведенная отраженная волна от линейного провода В; 5 – наведенная падающая волна от линейного провода С; 6 – наведенная отраженная волна от линейного провода С

Fig. 1. Distribution diagram of the amplitude values of the first pairs of incident and reflected waves of the electromagnetic field by the linear wire A of the homogeneous section of the three-phase three-wire transmission line: 1 – own incident wave; 2 – own reflected wave; 3 – induced incident wave from the linear wire B; 4 – induced reflected wave from the linear wire B; 5 – induced incident wave from the linear wire C; 6 – induced reflected wave from the linear wire C

На основании результатов вычисления постоянных интегрирования, используя уравнения (5)–(7) или (8), можно выполнить прогнозирование напряжений и токов в любом месте однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения, отстоящих от его конца на расстоянии u .

Пусть анализу подлежит однородный участок трехфазной ЛЭП-220 кВ трехпроводного исполнения протяженностью 300 км. Его ориентировочные первичные параметры на частоте основной гармонической составляющей [2, 5–14]:



$$R_{0Aн} = 0,42 \text{ Ом/км}; \quad R_{0Bн} = 0,40 \text{ Ом/км}; \quad R_{0Cн} = 0,43 \text{ Ом/км};$$

$$L_{0Aн} = 1,3369 \text{ мГн/км}; \quad L_{0Bн} = 1,3215 \text{ мГн/км}; \quad L_{0Cн} = 1,3300 \text{ мГн/км};$$

$$M_{0ABн} = 7,488 \text{ Гн/км}; \quad M_{0BCн} = 7,489 \text{ Гн/км}; \quad M_{0CAн} = 7,487 \text{ Гн/км};$$

$$C_{0A0н} = 10^{-8} \text{ мкФ/км}; \quad C_{0B0н} = 8,5 \cdot 10^{-9} \text{ мкФ/км}; \quad C_{0C0н} = 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ мкФ/км};$$

$$C_{0ABн} = 8 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}; \quad C_{0BCн} = 7 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}; \quad C_{0CAн} = 9 \cdot 10^{-11} \text{ мкФ/км}.$$

Передача электрической энергии по анализируемому участку ЛЭП обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля, каждая из которых характеризуется своей постоянной распространения. На частоте основной гармонической составляющей они имеют следующие значения:

$$\gamma_{1н} = (0 - j10) \text{ км}^{-1};$$

$$\gamma_{2н} = (0 + j) \text{ км}^{-1};$$

$$\gamma_{3н} = (0 + j10) \text{ км}^{-1}.$$

Вещественные составляющие постоянных распространения волн электромагнитного поля определяют коэффициенты затухания каждой пары этих волн. В данном случае коэффициенты затухания волн электромагнитного поля в проводах ЛЭП настолько малы, что в выполненном исследовании им были присвоены нулевые значения. Однако результирующая волна электромагнитного поля, получившаяся из результата сложения шести волн электромагнитного поля с нулевым затуханием, все-таки затухает.

Мнимые составляющие постоянных распространения волн электромагнитного поля определяют коэффициенты фазы. В рассматриваемом случае они оказались сравнительно велики. Большая величина коэффициентов фаз соответствует малой длине волн электромагнитного поля. Тем более длине результирующей волны. Именно этим обстоятельством вызван колебательный процесс распределения напряжения и тока вдоль линейного провода однородного участка анализируемой трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения.

Фазовая скорость тока падающей (отраженной) результирующей волны электромагнитного поля даже на частоте основной гармонической составляющей сравнительно мала:

$$v = \frac{2\pi f}{\alpha} = \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 50}{4,64} = 67,71 \text{ км/с},$$

где $\alpha = \sqrt[3]{\text{Im}(\gamma_{1н}) \cdot \text{Im}(\gamma_{2н}) \cdot \text{Im}(\gamma_{3н})} = \sqrt[3]{10 \cdot 1 \cdot 10} = 4,64 \text{ км}^{-1}$ – усредненный коэффициент фазы, который можно принять за коэффициент фазы результирующей волны электромагнитного поля.

Результирующая волна результирующего поля есть результат наложения шести волн. Поэтому длина результирующей волны зависит от фазового сдвига этих волн между собой. Минимально возможную длину волны определяют по формуле:

$$\lambda_{\min} = \frac{v}{af} = \frac{67,71}{6 \cdot 50} = 0,23 \text{ км}.$$



Максимально возможная длина результирующей волны электромагнитного поля определяется по формуле:

$$\lambda_{\max} = \frac{v}{f} = \frac{67,71}{50} = 1,35 \text{ км.}$$

Длина результирующей волны электромагнитного поля оказалась очень мала. Для ее достоверного выяснения необходимо рассмотреть однородный участок анализируемой ЛЭП сравнительно малой протяженности. Например, 10 км. Как это сделано на рис. 2, где представлена графическая интерпретация распределения фазного напряжения на частоте основной гармонической составляющей вдоль однородного участка трехфазной линии электропередачи трехпроводного исполнения протяженностью десять километров.

По рис. 2 видно, что распределение фазного напряжения вдоль анализируемого участка ЛЭП представляет собой сложный колебательный процесс. Он представляет собой совокупность колебаний различных амплитуд с вполне стабильным периодом порядка 0,6 км. Это значит, что длина результирующей волны электромагнитного поля 0,6 км. Это вполне соответствует неравенству:

$$\lambda_{\max} = 1,35 \text{ км} > \lambda = 0,6 \text{ км} > \lambda_{\min} = 0,23 \text{ км}.$$

Подобный результат визуального определения длины результирующей волны электромагнитного поля может быть получен и из графической интерпретации распределения линейного тока по тому же участку ЛЭП. Численное значение этого результата может отличаться от 0,6 км, но, тем не менее, оно будет удовлетворять неравенству $\lambda_{\max} > \lambda > \lambda_{\min}$.

Получается, что длина результирующей волны электромагнитного поля в каждом линейном проводе ЛЭП определяется первичными параметрами исследуемой линии электропередачи.

Представление о результатах передачи электрической энергии по анализируемой ЛЭП дают и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) напряжения и тока. АЧХ определяется зависимостью модулей передаточных функций от частоты.

Спектральные плотности выходных характеристик электрической энергии определяются по формулам:

$$U_{2A}(j\omega) = -\frac{U_{2An}\sqrt{2}}{n\omega}(\cos \varphi_{u2An} - j \sin \varphi_{u2An});$$
$$I_{2A}(j\omega) = -\frac{I_{1An}\sqrt{2}}{n\omega}(\cos \varphi_{i2An} - j \sin \varphi_{i2An}),$$

где φ_{u2n} и φ_{i2n} – начальные фазы напряжения фазы А и тока в линии А на частоте n -й гармонической составляющей в конце анализируемого участка ЛЭП.

Спектральные плотности входных характеристик электрической энергии определяются по формулам:

$$U_{1A}(j\omega) = -\frac{U_{An}\sqrt{2}}{n\omega}(\cos \varphi_{uAn} - j \sin \varphi_{uAn});$$
$$I_{1A}(j\omega) = -\frac{I_{An}\sqrt{2}}{n\omega}(\cos \varphi_{iAn} - j \sin \varphi_{iAn}),$$

где φ_{uAn} и φ_{iAn} – начальные фазы напряжения фазы А и тока в линии А на частоте n -й гармонической составляющей.

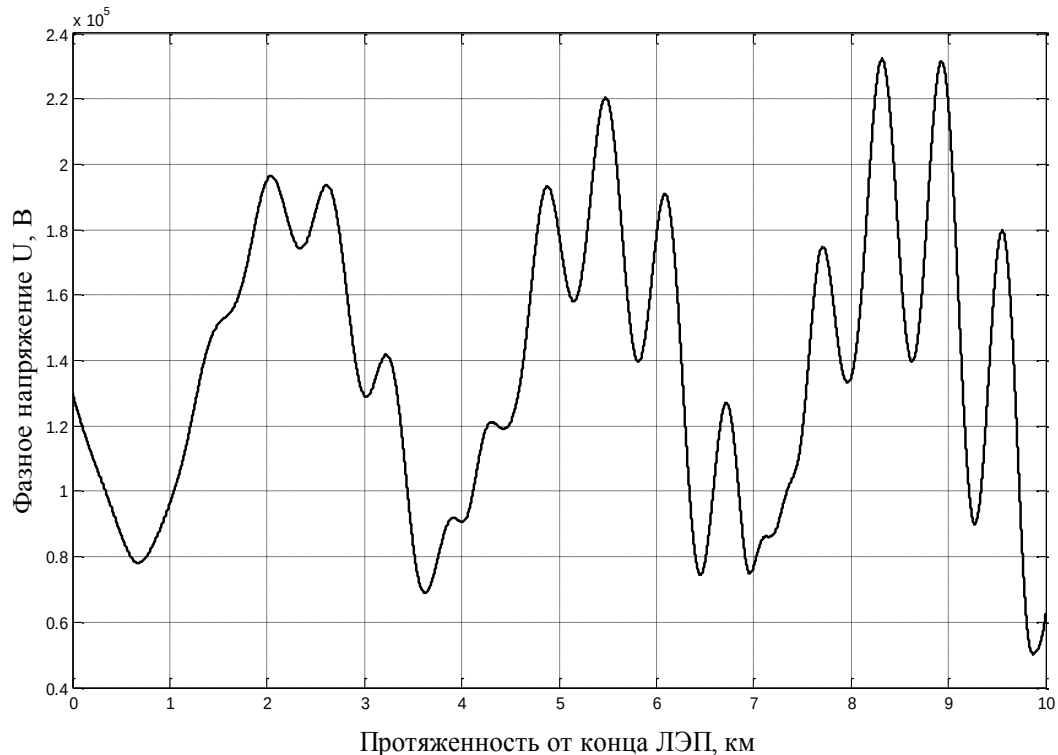


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения фазного напряжения от конца однородного участка ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей
Fig. 2. Graphical interpretation of phase voltage distribution from the end of the homogeneous section of the three-wire transmission line at the frequency of the main harmonic component

Напряжение $\dot{U}_{An}$ и ток $\dot{I}_{An}$ определяются из уравнений (5) и (8).

Передаточные функции по напряжению и по току для линейного провода А однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения определяются по формулам:

$$K_{AU}(j\omega) = \frac{U_{2An}(\cos \varphi_{u2An} - j \sin \varphi_{u2An})}{U_{An}(\cos \varphi_{uAn} - j \sin \varphi_{uAn})};$$

$$K_{AI}(j\omega) = \frac{I_{2An}(\cos \varphi_{i2An} - j \sin \varphi_{i2An})}{I_{An}(\cos \varphi_{iAn} - j \sin \varphi_{iAn})}.$$

где $U_{2A}(j\omega)$ и $I_{2A}(j\omega)$ – спектральные плотности выходных напряжения фазы А и тока в линии А того же участка ЛЭП.

Передаточные функции для других линейных проводов однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения формируются аналогично.

Сформированные таким образом передаточные функции исследуемого объекта по току и напряжению позволят построить частотные характеристики передачи электрической энергии по анализируемому участку трехпроводной ЛЭП (рис. 3, 4).

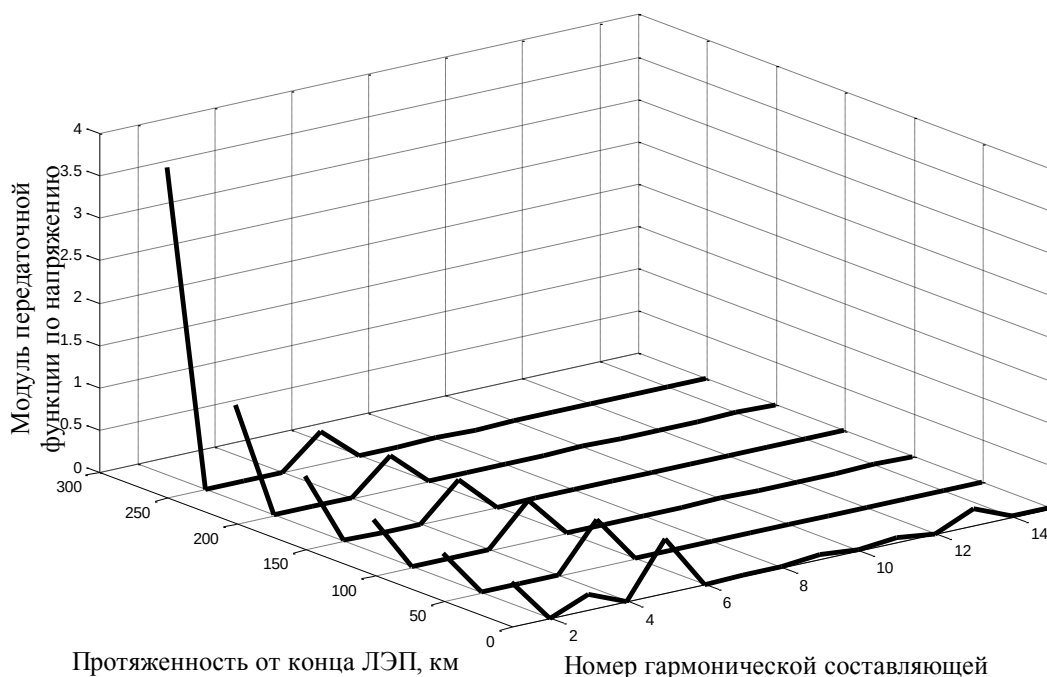


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики (АХЧ) однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения по напряжению
Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics of the homogeneous section of the three-phase three-wire transmission line for voltage

По этим характеристикам видно, что высшие гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, расположенной в конце анализируемого однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, быстро затухают.

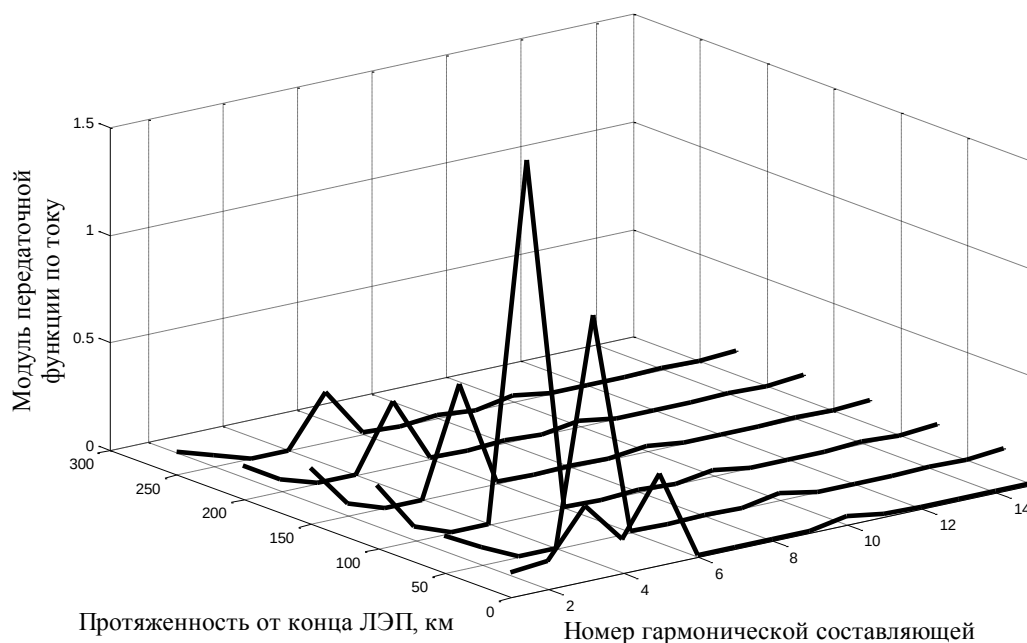


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики (АХЧ) однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения по току
Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of the homogeneous section of the three-phase three-wire transmission line for current



Заключение

По приведенным здесь результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Передача электрической энергии по ЛЭП трехпроводного исполнения на частоте каждой гармонической составляющей обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля. Причем все три пары волн электромагнитного поля присутствуют в каждом линейном проводе линии электропередачи, каждая из которых имеет составляющие, иллюстрирующие электромагнитную связь всех токоведущих частей ЛЭП.

2. Скорость передачи электрической энергии по каждому линейному проводу определяется фазовой скоростью результирующей волны электромагнитного поля. Она гораздо меньше скорости распространения магнитного поля в вакууме.

3. Процесс передачи электрической энергии носит сложный колебательный характер.

4. Длина результирующей волны электромагнитного поля в каждом линейном проводе ЛЭП определяется первичными параметрами анализируемой линии электропередачи.

Библиографический список

1. Якушев А.Я., Середа А.Г., Василенко М.Н., Булавский П.Е., Белозеров В.Л. Анализ электромагнитных процессов в однородной длинной линии // *Электротехника*. 2017. № 10. С. 23–28.
2. Большанин Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнения. Братск: Изд-во Братского гос. ун-та, 2016. 313 с.
3. Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Шишков Е.М. Математическая модель электромагнитного поля провода многоцепной воздушной линии электропередачи в установившемся режиме // *Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки*. 2013. № 4 (36). С. 150–154.
4. Костенко М.В., Перельман А.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272с.
5. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 4 (33). С. 35–40.
6. Панова Е.А., Савельева К.С. Определение удельных электрических параметров воздушных линий электропередачи // *Электрооборудование, эксплуатация и ремонт*. 2014. № 10. С. 16–22.
7. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушной линии электропередачи 330–500кВ; 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергия, 1974. 472 с.
8. Костенко М.В. Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // *Электричество*. 1955. № 10. С. 29–44.
9. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Косвенное измерение укрупненных первичных параметров двухпроводной линии электропередачи // *Измерительная техника*. 2016. № 5. С. 50–52.
10. Ferreira V.H., Zanghi R., Fortez M.Z., Sotelo G.G., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S.Jr. A survey on intelligent system transmission lines // *Electric Power System Research*. 2016. No. 136. P. 135–153.
11. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters Of a Two-Wire Transmission Line // *Measurement Techniques*. August 2016. Vol. 59. Issue 5. P. 521–525.
12. Пат. № 2210154, Российская Федерация, МКИ Н 02 J 3/01. Способ прогнозирования гармонических составляющих электрической энергии по неразветвленным участкам электроэнергетической системы / Большанин Г.А. № 2001106402; заявл. 06.03.01; опубл. 10.08.03.
13. Большанин Г.А. Математическое моделирование распределения электрической энергии низкого качества в трехфазной четырехпроводной электроэнергетической системе // *Математика в вузе: труды Междунар. науч.-метод. конф. (г. Санкт-Петербург, сентябрь 2004 г.)*. Санкт-Петербург, 2004. С. 117–119.
14. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г., Харин С.И. Применение теоремы о многополюсниках для анализа распределения электрической энергии пониженного качества по ЛЭП. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири // *Материалы Межрегиональной научно-технической конференции (Братск, 2007 г.)*. Братск, 2007. С. 24–25.

References

1. Yakushev A.Ya., Sereda A.G., Vasilenko M.N., Bulavskij P.E., Belozarov V.L. Analysis of electromagnetic processes in a homogeneous long line. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2017, no. 10, pp. 23–28. (In Russian)
2. Bol'shanin G.A. *Peredacha elektricheskoy energii po LEP odno-, dvuh- i trekhpro-vodnogo ispolneniya* [Transmission of



- electric energy by one-, two - and three-wire power lines]. Bratsk: Bratsk State University Publ., 2016, 313 p. (In Russian)
3. Vedernikov A.S., Gol'dshteyn V.G., Shishkov E.M. Mathematical model of electromagnetic field of the multicircuit overhead power line wire operating at stationary mode. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2013, no. 4 (36), pp. 150–154. (In Russian)
4. Kostenko M.V., Perel'man A.S., Shkarin Yu.P. *Volnovye processy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* [Wave processes and electrical interference in multi-wire high-voltage lines]. Moscow: Energiya Publ., 1973, 272 p. (In Russian)
5. Panova E.A., Al'brekht A.Ya. Specified Per-Unit Parameters of Double Circuit 110 kV Overhead Lines for Distant Fault Location. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 35–40. (In Russian)
6. Panova E.A., Savel'eva K.S. Determination of specific electrical parameters of overhead transmission lines. *Elektrooborudovanie, ekspluatatsiya i remont* [Electrical Equipment, Operation and Repair], 2014, no. 10, pp. 16–22. (In Russian)
7. Mel'nikov N.A., Rokotyan S.S., Sherencis A.N. *Proektirovanie elektricheskoy chasti vozduшной linii elektropereдачи 330–500kV* [Design of an electrical part of the 330–500kV overhead transmission line]. Moscow: Energiya Publ., 1974, 472 p. (In Russian)
8. Kostenko M.V. Mutual resistances between air lines taking into account the surface effect in the ground. *Elektrichestvo* [Electricity], 1955, no. 10, pp. 29–44. (In Russian)
9. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters of a Two-Wire Transmission Line. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2016, no. 5, pp. 50–52. (In Russian)
10. Ferreira V.H., Zanghi R., Fortez M.Z., Sotelo G.G., Silva R.B.M., Souza J.C.S., Guimarães C.H.C., Gomes S.Jr. A survey on intelligent system transmission lines. *Electric Power System Research*, 2016, no. 136, pp. 135–153.
11. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G. Indirect Measurement of Aggregate Primary Parameters Of a Two-Wire Transmission Line. *Measurement Techniques*. August 2016, vol. 59, Issue 5, pp. 521–525.
12. Bol'shanin G.A. *Sposob prognozirovaniya garmonicheskikh sostavlyayushchih elektricheskoy energii po nerazvetvlenным uchastkam elektroenergeticheskoy sistemy* [Method to predict harmonic components of electrical energy on power system single-path sections]. Patent RF, no. 2210154, 2003.
13. Bol'shanin G.A. *Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya elektricheskoy energii nizkogo kachestva v trekhfaznoy chetyrekhprovodnoy elektroenergeticheskoy sisteme* [Mathematical modeling of the low-quality electric energy distribution in a three-phase four-wire electric power system]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferencii "Matematika v vuze"* [Proceedings of the International scientific and methodical conference "Mathematics in Higher School" St. Petersburg, September 2004]. Saint-Petersburg, 2004, pp. 117–119. (In Russian)
14. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'yasova E.G., Harin S.I. *Primenenie teoremy o mnogopolyusnikah dlya analiza raspredeleniya elektricheskoy energii ponizhennogo kachestva po LEP. Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri* [Application of the theorem on multipoles to analyze low quality electric energy distribution in transmission lines. Natural and engineering sciences for Siberian regions development]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Materials of the Interregional Scientific and Technical Conference, Bratsk, 2007]. Bratsk, 2007, pp. 24–25. (In Russian)

Критерий авторства

Большанин Г.А. предложил методику прогнозирования распределения гармонических составляющих напряжений и токов в линиях электропередачи трехпроводного исполнения, подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bolshinin G.A. proposed the methods of predicting the voltage and current harmonic component distribution in three-wire power lines, prepared the manuscript for publication 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

Большанин Георгий Анатольевич, доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электротехники, e-mail: bolshaning@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Georgy A. Bolshinin, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, e-mail: bolshaning@mail.ru



Исследование гиперповерхности мощностей установившихся режимов электрической системы

© В.В. Давыдов*, П.М. Ерохин**

*Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири, г. Улан-Удэ, Российская Федерация

**АО «СО ЕЭС», г. Екатеринбург, Российская Федерация

Резюме: Исследован вектор нормали гиперповерхности мощностей установившихся режимов электрической системы. Установлена взаимосвязь компонент вектора нормали через относительные приросты потерь активной мощности. Анализ компонент вектора нормали показал, что в предельном режиме электрической системы компонента вектора нормали активной мощности балансирующего узла равна нулю, а относительный прирост потерь активной мощности балансирующего узла – единице. Поэтому в предельном режиме любые попытки балансирующего узла поддержать баланс активной мощности в электрической системе полностью блокируются возникающими при этом потерями. В реальных электрических системах изменение месторасположения балансирующего узла делает этот установившийся режим неопредельным. Только в консервативной электрической системе предельный режим останется предельным безотносительно выбора балансирующего узла.

Ключевые слова: балансирующий узел, гиперповерхность мощностей, относительные приросты потерь, потоко-распределение, предельный режим, установившийся режим, электрическая система

Информация о статье: Дата поступления 14 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 16 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Давыдов В.В., Ерохин П.М. Исследование гиперповерхности мощностей установившихся режимов электрической системы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):101–106. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-101-106.

Studying power hypersurface of power system steady states

Viktor V. Davydov, Petr M. Erokhin

Branch of System Operator of the United Power System JSC – ODU of Siberia, Ulan-Ude, Russian Federation

Company System Operator of the United Power System JSC, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract: The study is given to the normal vector of the power hypersurface of power system steady states. The interrelation of the components of the normal vector is determined through incremental transmission loss coefficients. The analysis of the normal vector components has revealed that in the marginal state of the power system the component of the normal vector of slack bus active power equals zero, and the incremental transmission loss coefficient of the slack bus active power is one. Therefore, any attempts of the slack bus to support the power system active power balance in the marginal state are fully compensated by the associated power losses. In real power systems, variation of slack bus location makes this steady state non-marginal. The only power system where the marginal state does not depend upon a slack bus location is a lossless one.

Keywords: slack bus, power hypersurface, incremental transmission losses, power flow, marginal state, steady state, power system

Information about the article: Received December 14, 2018; accepted for publication January 16, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Davydov V.V., Erokhin P.M. Studying power hypersurface of power system steady states. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):101–106. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-101-106.

Введение

В настоящее время в теории режимов и статической устойчивости электрических систем (ЭС) используется в основном алгебраически-аналитический подход [1–13]. Математические соотношения и выражения являются хорошими инструментами для численного решения, но в случае многомерных систем сложны для качественного анализа. Вместе с тем развитие теорий



особенностей, бифуркации и катастроф показывает, что геометрическое рассмотрение позволяет воспользоваться мощными средствами современной геометрии и получить новые результаты [14]. В работе [15] была предложена геометрическая интерпретация решений системы уравнений установившихся режимов (УУР) как гиперповерхности в пространстве мощностей (ГМ). Отображение всей совокупности установившихся режимов (УР) ЭС посредством ГМ позволяет воспользоваться инструментарием дифференциальной геометрии для их исследования.

Вектор нормали гиперповерхности мощностей

Одним из инструментов дифференциальной геометрии являются касательные гиперплоскости к ГМ и их векторы нормали. Выражение для гиперплоскости, касательной к ГМ, можно получить, если воспользоваться УУР в форме узловых балансов активных ($\Delta P_k(P_k, V, \delta) = 0$, $k \in PV + PQ + b$) и реактивных ($\Delta Q_k(Q_k, V, \delta) = 0$, $k \in PQ$) мощностей в полярной (V, δ) -системе координат и представить их линеаризованные уравнения в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_{PQ+PV}}{\partial \delta_{PQ+PV}} & \frac{\partial \Delta P_{PQ+PV}}{\partial V_{PQ}} \\ \frac{\partial \Delta Q_{PQ}}{\partial \delta_{PQ+PV}} & \frac{\partial \Delta Q_{PQ}}{\partial V_{PQ}} \\ \frac{\partial \Delta P_b}{\partial \delta_{PQ+PV}} & \frac{\partial \Delta P_b}{\partial V_{PQ}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_{PQ+PV} \\ \Delta V_{PQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta P_{PQ+PV} \\ \Delta Q_{PQ} \\ \Delta P_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где индексами PV и PQ обозначен тип узлов, а b – балансирующий узел (БУ). В отличие от обычных линеаризованных УУР, используемых при расчете УР, в этой системе явно представлено также линеаризованное уравнение баланса активной мощности в БУ. Следовательно, матрица Якоби в (1) является прямоугольной, у нее число строк на единицу превышает число столбцов. Согласно теории линейной алгебры, строки такой прямоугольной матрицы являются линейно-зависимыми, а значит, всегда существует ненулевой вектор $N = [N^{PT}, N^{QT}, N_b^P]^T$ такой, что

$$\begin{bmatrix} N^{PT} \\ N^Q \\ N_b^P \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_{PQ+PV}}{\partial \delta_{PQ+PV}} & \frac{\partial \Delta P_{PQ+PV}}{\partial V_{PQ}} \\ \frac{\partial \Delta Q_{PQ}}{\partial \delta_{PQ+PV}} & \frac{\partial \Delta Q_{PQ}}{\partial V_{PQ}} \\ \frac{\partial \Delta P_b}{\partial \delta_{PQ+PV}} & \frac{\partial \Delta P_b}{\partial V_{PQ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T. \quad (2)$$

Поэтому умножение (1) слева на вектор-строку N^T с учетом (2) дает

$$N^{PT} \Delta P_{PV+PQ} + N_b^P \Delta P_b + N^{QT} \Delta Q_{PQ} = 0, \quad (3)$$

что представляет собой уравнение гиперплоскости, касательной к ГМ в пространстве мощностей. Поэтому (3) определяет вектор N как вектор нормали к этой касательной гиперплоскости, а, следовательно, и к самой ГМ. Согласно (2), вектор нормали ГМ может быть получен из решения системы линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_{PQ+PV}}{\partial \delta_{PQ+PV}} & \frac{\partial \Delta P_{PQ+PV}}{\partial V_{PQ}} \\ \frac{\partial \Delta Q_{PQ}}{\partial \delta_{PQ+PV}} & \frac{\partial \Delta Q_{PQ}}{\partial V_{PQ}} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} N^P \\ N^Q \end{bmatrix} = -N_b^P \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_b}{\partial \delta_{PQ+PV}} \\ \frac{\partial \Delta P_b}{\partial V_{PQ}} \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

в которой матрица коэффициентов является транспонированной матрицей Якоби потокораспределения. Вектор нормали определяется системой (4) с точностью до множителя. Задав конкретное



ненулевое значение компоненты БУ вектора нормали, остальные можно найти решением (4).

Исследование вектора нормали

Если воспользоваться уравнениями общего баланса активной мощности в ЭС $\Delta P = \sum P_k - \pi = 0$ и баланса мощности в БУ $\Delta P_b(P_b, V, \delta) = 0$, продифференцировать эти уравнения по независимым переменным с учетом зависимых переменных [16], можно установить, что компоненты вектора нормали ГМ взаимосвязаны через относительные приросты потерь $\partial\pi/\partial P_k$ и $\partial\pi/\partial Q_k$:

$$N_k^P = (1 - \partial\pi/\partial P_k) N_b^P; \quad N_k^Q = -\partial\pi/\partial Q_k N_b^P. \quad (5)$$

Рассмотрим особенности вектора нормали ГМ в предельном режиме ЭС (ПР). Согласно (4) и (5), компоненты вектора нормали могут принимать различные значения. Предположим, что в какой-то точке ГМ компонента N_m^P вектора нормали равна нулю. Согласно (5), это будет только в том случае, когда $1 - \partial\pi/\partial P_m = 0$, т.е.

$$N_m^P = 0 \Rightarrow \partial\pi/\partial P_m = 1. \quad (6)$$

Предположим, что узел m переназначается БУ в этой точке. Тогда скорректированная система линейных уравнений (4) примет вид

$$\begin{bmatrix} \partial\Delta P_{PQ+PV}/\partial\delta_{PQ+PV} & \partial\Delta P_{PQ+PV}/\partial V_{PQ} \\ \partial\Delta Q_{PQ}/\partial\delta_{PQ+PV} & \partial\Delta Q_{PQ}/\partial V_{PQ} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} N^P \\ N^Q \end{bmatrix} = -N_m^P \begin{bmatrix} \partial\Delta P_m/\partial\delta_{PQ+PV} \\ \partial\Delta P_m/\partial V_{PQ} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

В этом случае условие (7) определяет вырожденность матрицы Якоби потокораспределения, т.е. предельный режим ЭС [17]. Поэтому, согласно (6), в ПР относительный прирост потерь активной мощности для БУ равен 1. Другими словами, в ПР БУ не способен поддерживать режим одного или ряда узлов ЭС. Все его попытки сбалансировать активную мощность в ЭС будут нивелироваться потерями активной мощности, обусловленными такими манипуляциями. БУ в ПР как бы теряет связь с частью или со всей ЭС. Это соответствует отсутствию БУ со всеми вытекающими последствиями.

Интерпретация гиперповерхности ПР (ГПР) в подпространстве задаваемых мощностей узлов [15], как граница проекции ГМ на это подпространство вдоль оси активной мощности БУ, позволяет установить интересную связь между вектором нормали ГМ в ПР и вектором нормали ГПР. Согласно (6), в ПР компонента вектора нормали ГМ, соответствующая активной мощности БУ, равна нулю. Поэтому в ПР вектор нормали ГМ ортогонален оси активной мощности БУ и будет проецироваться на подпространство задаваемых мощностей в натуральную величину. Поэтому компоненты вектора нормали ГПР будут в точности равны соответствующим компонентам вектора нормали ГМ в ПР.

Влияние месторасположения балансирующего узла на предельные режимы

При смене БУ в ПР, условия (6)–(7) удовлетворяться в общем случае не будут, если только компонента активной мощности вектора нормали для нового БУ не будет равна нулю. Простая система с четырьмя PV узлами на рис. 1 позволяет продемонстрировать это.

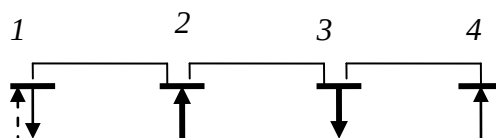


Рис. 1. 4-узловая ЭС
Fig. 1. 4-bus power system

В табл. 1 представлены мощности узлов (P) в МВт (знак минус соответствует генерации) и компоненты вектора нормали ГМ (N) для исходного режима и для ПР с БУ-4, а также с БУ-1. Эти ПР получены в результате одинакового увеличения генерации в узле 2 и нагрузки в узле 3 методом последовательного утяжеления. Сопротивления линий были приняты $Z_{12}=Z_{34}=5+j10 \Omega$, $Z_{23}=20+j40 \Omega$ и $V_1=V_2=V_3=V_4=110 \text{ kV}$.

Таблица 1

Параметры ПР 4-узловой ЭС

Table 1

Marginal state parameters of a 4-bus power system

Режим	$P N$	Узел			
		1	2	3	4
Исходный	P	20	-50	50	-22,1951
	N	0,9259	0,9069	1,0231	1
ПР с БУ-4	P	20	-411,77	411,77	-465,27
	N	-1	-0,9794	0	0
ПР с БУ-1	P	-118,72	-171,51	171,51	-22,1951
	N	0	0	1	0,9775

Рассмотрим параметры ПР с БУ-4. Так как передача мощности через линию 2-3 сопровождается потерями активной мощности, БУ-4 поддерживает передачу этой мощности через линию 3-4. ПР достигается, когда наступит предел передаваемой мощности через линию 2-3. УР останется предельным, если БУ будет переназначен узел 3, так как, согласно табл. 1, его компонента вектора нормали равна нулю. Однако этот УР не останется предельным, если БУ будет назначен узел 1, т.к. его компонента вектора нормали не равна нулю и поэтому существует возможность увеличения генерации в узле 2 и нагрузки в узле 3. В ПР относительный прирост потерь для узла 4 с БУ-1 или 2 равен единице. ПР с БУ-1 будет другим, т.к. в этом случае БУ-1 поддерживает УР через линию 1-2. С ростом передаваемой мощности по линии 2-3 относительный прирост потерь БУ-1 увеличивается. Как только он достигнет единицы, увеличение нагрузки в узле 3 станет невозможным. БУ-1 неспособен поддержать УР в узлах 3 и 4 в этом ПР. ПР останется предельным, если узел 2 станет БУ, так его компонента вектора нормали ГМ равна нулю. Этот УР не будет предельным, если БУ будет назначен узел 3 или 4, т.к. эти узлы имеют ненулевые компоненты вектора нормали.

Влияние размещения БУ на получаемый ПР можно легко объяснить с помощью ГМ [15]. Каждый УР ЭС соответствует определенной точке на ГМ и наоборот. Проекция ГМ вдоль оси активной мощности БУ на подпространство всех других задаваемых мощностей представляет собой область существования режимов ЭС (ОСР). Границы этой проекции, т.е. ОСР, соответствуют множеству ПР. Так как обычно ГМ не является «плоской», точки на ГМ, которые соответствуют границе такой проекции, т.е. ПР, будут иными при другом БУ. Поэтому изменение месторасположения БУ в ПР делает этот УР неопредельным. Исключением является консервативная модель ЭС. Так, например, ПР будут одинаковыми с БУ 1 и 4 для 4-узловой консервативной ЭС. В табл. 2 представлены исходный режим и параметры ПР для этой ЭС с $Z_{12}=Z_{34}=j10 \Omega$, $Z_{23}=j40 \Omega$.



Таблица 2

Параметры ПР 4-узловой консервативной ЭС

Table 2

Marginal state parameters of a 4-bus lossless power system

Режим	$P N$	Узел			
		1	2	3	4
Исходный	P	20	-50	50	-20
	N	1	1	1	1
ПР с БУ-4	P	20	-322,5	322,5	-20
	N	1	1	0	0
ПР с БУ-1	P	20	-322,5	322,5	-20
	N	0	0	1	1

В любой консервативной ЭС ПР останется предельным безотносительно выбора БУ, что также можно объяснить с помощью ГМ [15]. ГМ консервативной ЭС представляет собой «плоскую» гиперповерхность, т.к. отсутствуют потери активной мощности, и мощности узлов удовлетворяют уравнению $\sum P_k = 0$. Только край «плоской» ГМ соответствуют ПР и только его проекция вдоль оси активной мощности любого БУ на подпространство всех других узловых мощностей является границей ОСР консервативной ЭС. Поэтому ПР консервативной ЭС не зависит от месторасположения БУ.

Заключение

Анализ компонент вектора нормали гиперповерхности мощностей установившихся режимов электрической системы показал их взаимосвязь через относительные приросты потерь. В предельном режиме ЭС компонента вектора нормали активной мощности балансирующего узла равна нулю, а относительный прирост потерь БУ – единице. Поэтому в ПР любые попытки БУ поддержать баланс мощности в ЭС полностью блокируются возникающими при этом потерями. Неспособность БУ поддержать УР даже в некоторых узлах ЭС определяет ПР. БУ в ПР как бы теряет связь с частью или со всей ЭС. Это соответствует отсутствию БУ со всеми вытекающими последствиями. В реальных ЭС изменение месторасположения БУ делает этот УР неопредельным. Только в консервативной электрической системе ПР останется предельным безотносительно выбора БУ.

Библиографический список

1. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1964. 79 с.
3. Venikov V.A., Stroeve V.A., Idelchik V.I., Tarasov V.I. Estimation of electrical power system steady state stability in load flow calculations // IEEE Trans. on PAS Vol. PAS-94. No. 3. P. 1034–1041, May/June 1975.
4. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. М.: Энергия, 1977. 192 с.
5. Васин В.П. Области существования установившихся режимов электрических систем. М.: МЭИ, 1982. 84 с.
6. Конторович А.М., Крюков А.В. Предельные режимы энергосистем. Основы теории и методы расчетов. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 1985. 72 с.
7. Ушаков Е.И. Статическая устойчивость электрических систем. Новосибирск: Наука, 1988. 273 с.
8. Тарасов В.И. Теоретические основы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука, 2002. 344 с.
9. Kundur P. Power system stability and control. N.-Y.: McGraw-Hill, 1994. 1167 p.
10. Sauer P.W., Pai M.A. Power system steady-state stability and the load-flow Jacobian // IEEE Trans. Power Syst. vol. 5, no. 4, November 1990. P.1374–1383.
11. Sauer P.W., Pai M.A. Power system dynamics and stability. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357 p.
12. Machowski J., Bialek J.W., Bubbly J.R. Power system dynamics: stability and control. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 629 p.
13. Padiyar K.R. Power system dynamics stability and control. Hyderabad: BS Publications, 2008. 571 p.
14. Арнольд В.И. Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.



15. Давыдов В.В., Ерохин П.М., Кирилов К.Ю. Гиперповерхность мощностей установившихся режимов электрической системы // Электроэнергетика глазами молодежи: научн. тр. III Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 22–26 октября 2012 г.). Екатеринбург, 2012. Т. 1. С. 131–134.
16. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M. Nonlinear-programming-based model of power system marginal states: Theoretical substantiation [Электронный ресурс]. URL: <http://arxiv.org/abs/1505.03991> (дата обращения: 15.10.2018).
17. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М. Оптимизационная модель предельных режимов электрических систем // Электричество. 2010. № 11. С. 2–12.

References

1. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh system* [Stability problems of electric power systems]. Moscow: Energiya Publ., 1979, 456 p. (In Russian)
2. Venikov V.A. *Perekhodnyye elektromekhanicheskiye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient electromechanical processes in electric power systems]. Moscow: Energiya Publ., 1964, 379 p. (In Russian)
3. Venikov V.A., Stroeve V.A., Idelchik V.I., Tarasov V.I. Estimation of electrical power system steady state stability in load flow calculations. IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-94, no. 3, pp. 1034–1041, May/June 1975.
4. Idelchik V.I. *Raschety ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh system* [Calculations of electric power systems steady states]. Moscow: Energiya Publ., 1977. 192 p. (In Russian).
5. Vasin V.P. *Oblasti sushchestvovaniya ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh sistem* [Existence ranges of electric power system steady states]. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 1982, 84 p. (In Russian)
6. Kontorovich A.M., Kryukov A.V. *Predel'nyye rezhimy energosistem. Osnovy teorii i metody raschetov* [Power system marginal states. Basics of theory and calculation methods]. Irkutsk: Irkutsk University Publ., 1985, 72 p. (In Russian)
7. Ushakov E.I. *Sticheskaya ustoychivost' elektricheskikh system* [Static stability of electrical systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988, 273 p. (In Russian)
8. Tarasov V.I. *Teoreticheskiye osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Theoretical bases of the electric power system steady state analysis]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2002, 344 p. (In Russian).
9. Kundur P. Power system stability and control. N.-Y.: McGraw-Hill, 1994, 1167 p.
10. Sauer P.W., Pai M.A. Power system steady-state stability and the load-flow Jacobian. IEEE Trans. Power Syst. vol. 5, no. 4, November 1990. P. 1374–1383.
11. Sauer P.W., Pai M.A. Power system dynamics and stability. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357 p.
12. Machowski J., Bialek J.W., Bubbly J.R. Power system dynamics: stability and control. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 629 p.
13. Padiyar K.R. Power system dynamics stability and control. Hyderabad: BS Publications, 2008, 571 p.
14. Arnold V.I. *Teoriya katastrof* [Catastrophe theory]. Moscow: Nauka Publ., 1990, 128 p. (In Russian).
15. Davydov V.V., Erokhin P.M., Kirilov K.Y. *Giperpoverkhnost' moshchnostey ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskoy systemy* [Hypersurface of capacities of power system steady states]. *Trudy III mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroenergetika glazami molodezhi"* [Proceedings of III International Scientific and Technical Conference "Power industry through the eyes of young people"]. Yekaterinburg, 2012, vol. 1, pp. 131–134. (In Russian)
16. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M. Nonlinear-programming-based model of power system marginal states: Theoretical substantiation. Available at: <http://arxiv.org/abs/1505.03991>. (available at: 15 October 2018).
17. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M. *Optimizatsionnaya model' predel'nykh rezhimov elektricheskikh system* [Optimization model of power system marginal states]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2010, no. 11, pp. 2–12. (In Russian)

Критерий авторства

Давыдов В.В. и Ерохин П.М. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Davydov V.V. and Erokhin P.M. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Давыдов Виктор Васильевич, кандидат технических наук, ведущий специалист, e-mail: davv@bur.so-ups.ru

Ерохин Петр Михайлович, доктор технических наук, советник директора, e-mail: epm@ural.so-ups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Davydov, Cand. Sci. (Eng.), Leading specialist, e-mail: davv@bur.so-ups.ru

Petr M. Erokhin, Dr. Sci. (Eng.), Director's Advisor, e-mail: epm@ural.so-ups.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.301

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-107-114>

Оптимизационные исследования угольного энергоблока на повышенные параметры пара мощностью 660 мВт

© А.М. Клер, П.В. Жарков, Н.О. Епишкин

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

Резюме: В данной работе проведены оптимизационные исследования угольного энергоблока на повышенные параметры пара, мощностью 660 МВт по критерию максимума коэффициента полезного действия нетто, минимума удельных капиталовложений, а также построена зависимость между коэффициентом полезного действия энергоблока и минимальными удельными капиталовложениями. Принимая во внимание необходимость учета большого числа параметров угольного энергоблока, оптимизационные исследования проводились с использованием градиентных методов нелинейного математического программирования. В связи с большим объемом вычислений, использована программная среда ПВК-СМПП. Максимальный коэффициент полезного действия, полученный в результате оптимизационных расчетов, равен 47,74%, соответствующие ему удельные капиталовложения – 3545,7 долл/кВт и начальные параметры пара – 35,4 МПа, 657/613°C. Минимальные удельные капиталовложения равны 1884,6 долл/кВт, соответствующий им коэффициент полезного действия равен 42,08% и начальные параметры пара – 15,5 МПа, 613/540°C. Проведена оптимизация угольного энергоблока на повышенные параметры пара, мощностью 660 МВт по критерию максимума коэффициента полезного действия нетто, и минимума удельных капиталовложений. Получена зависимость минимальных удельных капиталовложений от коэффициента полезного действия нетто энергоблока. Показано, что минимальные удельные капиталовложения были получены при низком давлении и довольно высокой температуре перегретого пара.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, градиентные методы, математическое моделирование, нелинейное математическое программирование, угольный энергоблок, сталь аустенитного класса

Информация о статье: Дата поступления 03 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 10 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Клер А.М., Жарков П.В., Епишкин Н.О. Оптимизационные исследования угольного энергоблока на повышенные параметры пара мощностью 660 мВт. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):107–114. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-107-114.

Optimization study of the 660 MW coal-fired power unit for elevated steam parameters

Aleksandr M. Kler, Pavel V. Zharkov, Nikolay O. Epishkin

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: This paper carries out optimization studies of the 660 MW coal-fired power unit for elevated steam parameters by the criterion of maximum net efficiency and minimum specific investment. The dependence between the power unit efficiency and the lowest specific investment is built. Taking into account the need for accounting a large number of coal-fired power unit parameters the optimization studies were carried out using gradient methods of nonlinear mathematical programming. Due to the large number of calculations the computerized programming system (CPS) computational environment is used. The maximum efficiency obtained as a result of optimization calculation is 47.74%. The corresponding specific investment equals 3545.7 \$/kW and the initial steam parameters are 35.4 MPa, 657/613 °C. The minimum specific investment is 1884.6 \$/kW. The corresponding efficiency equals 42.08%. The initial steam parameters are 15.5 MPa, 613/540 °C. The 660 MW coal-fired power unit was optimized for elevated steam parameters by the criterion of maximum net efficiency and minimum specific investment. The dependence of the minimum specific investment on power unit net efficiency was obtained. It is shown that the minimum specific investment was obtained at low pressure and relatively high temperature of the main steam.

Keywords: parametric optimization, gradient methods, mathematical modeling, nonlinear mathematical programming, coal-fired power unit, austenitic steel

Information about the article: Received December 03, 2018; accepted for publication January 10, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Optimization study of the 660 MW coal-fired power unit for elevated steam parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):107–114. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-107-114.



Введение

Получение высокого коэффициента полезного действия (КПД) в паротурбинных энергоблоках на твердом топливе возможно за счет увеличения термодинамических параметров острого пара и пара промежуточного перегрева. Такое увеличение обеспечивается, в первую очередь, за счет использования термостойких сталей и сплавов для изготовления работающих в области высоких температур элементов парового котла и паровой турбины. Рост указанных параметров приводит к существенному росту удельных (на единицу полезной электрической мощности) капиталовложений в энергоблок.

Технические решения, обеспечивающие рост их энергетической, экологической и экономической эффективности представляют значительный научный и практический интерес, так как современные угольные энергоблоки большой мощности имеют значительную стоимость, потребляют в процессе эксплуатации существенные объемы органического топлива и выбрасывают большое количество парниковых газов.

При исследованиях сложных теплоэнергетических установок (ТЭУ), в частности угольных энергоблоков на повышенные параметры пара используют методы математического моделирования и оптимизации. Использование этих методов для исследования ТЭУ, в том числе угольных паротурбинных энергоблоков, посвящено достаточно большое количество работ.

В работе [1] используются метод Нелдера-Мида и эволюционные алгоритмы для оптимизации угольного энергоблока на сверхкритические параметры пара (СКП). Нейронные сети и генетические алгоритмы для оптимизации СКП блока применялись в работе [2]. Неградиентные методы Нелдера-Мида, Хука-Дживса и Розенброка применялись в [3] для оптимизации энерго-

блока на ультрасверхкритические параметры пара. В [4] использовался метод роя частиц для оптимизации структурных параметров экономайзера низкого давления для 600 МВт угольного энергоблока. Генетический алгоритм недоминируемой сортировки II и метод нечеткой логики применялись в [5, 6] для оптимизации энергетических установок.

Следует отметить, что в указанных работах для определения рациональных параметров используются различные методы направленного перебора параметров, которые эффективны лишь при выборе их небольшого числа (не более 10–15). При большем числе параметров методы не гарантируют хорошее приближение к оптимальному решению. В то же время для обоснованной оптимизации такой сложной технической системы как угольный энергоблок большой мощности, требуется провести согласованный выбор нескольких десятков параметров технологических связей между элементами схемы и внутренних параметров отдельных элементов.

Практически единственным эффективным инструментом решения таких оптимизационных задач являются градиентные методы нелинейной оптимизации. В институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН в течение длительного времени проводилась разработка таких методов с их применением для задач оптимизации параметров различных энергетических установок [7, 8]. Необходимо отметить, что для построения зависимостей между КПД и минимальными удельными капиталовложениями энергоблока требуется достаточно высокая точность решения задач оптимизации. Работы по созданию (отвечающему этому требованию) метода велись в ИСЭМ СО РАН [9].

Задачи оптимизации параметров энергоблоков на твердом топливе

Необходимо отметить, что для энергетических установок, сжигающих твердое топливо, характерно следующее. Часть со-

ставляющих удельных капиталовложений с ростом КПД установки, т.е. с ростом ее энергетической эффективности увеличивается,



другая часть падает. К первой части относятся стоимости поверхностей нагрева парового котла, цилиндров высокого и среднего давления паровой турбины, регенеративных подогревателей, конденсаторов. Ко второй – капиталовложения в системы топливоподачи, пылеприготовления, золоудаления, очистки и удаления дымовых газов, систем отвода тепла в окружающую среду. В работе [8] показано, что зависимость минимальных удельных капиталовложений угольных энергоблоков как функции от КПД нетто имеет минимум при определенном КПД. Значение КПД, при котором достигается минимум, зависит от соотношения стоимостей различных элементов оборудования энергоблока. Очевидно, что оптимальный по критерию экономической эффективности КПД энергоблока при заданной цене топлива должен находиться в диапазоне, лежащем между КПД, при котором достигаются минимальные удельные капиталовложения, и максимальным КПД.

С учетом этого возникает три задачи оптимизации параметров энергоблока, как задачи нелинейного математического программирования, имеющие следующие формулировки:

1. Максимизация КПД нетто η (Задача 1)

$$\max \eta, \quad (1)$$

при условиях:

$$H(x, y, z) = 0, \quad (2)$$

$$G(x, y, z) \geq 0, \quad (3)$$

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad (4)$$

$$\underline{y} \leq y \leq \bar{y}, \quad (5)$$

где $\eta = W_{net} / (B \cdot Q_n^p)$; W_{net} – полезная мощность энергоблока, кВт; B – расход топлива, кг/с; Q_n^p – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; H – l -мерная функция ограничений-равенств; x – n -мер-

ный вектор независимых оптимизируемых параметров; y – l -мерный вектор вычисляемых (зависимых) параметров; z – вектор, задающий внешние условия работы энергоблока и некоторые неоптимизируемые конструктивные параметры; G – m -мерная векторная функция ограничений-неравенств; $\underline{x}, \bar{x}, \underline{y}, \bar{y}$ – векторы, компоненты которых задают нижнюю и верхнюю границы диапазона изменения соответствующих компонент векторов x, y . Обозначим КПД в точке решения этой задачи через $\eta^{\max}$.

2. Минимизация удельных капиталовложений k_{yo} (Задача 2):

$$\min k_{yo}, \quad (6)$$

при условиях (2)-(5), где $k_{yo} = K / W_{net}$; K – капиталовложения в энергоблок, тыс. долл. Обозначим КПД в точке решения этой задачи через $\eta^{k_{yo}}$.

При расчете капиталовложений в установку учитывались стоимости основных элементов котла и турбины. При этом стоимость теплообменного оборудования принималась прямо пропорциональной массе теплообменных труб с учетом цены металла, из которого изготавливались данные трубы. Пропорционально массе металла определялись капиталовложения в трубопроводы острого пара, пара промперегрева и питательной воды. Затраты на насосы и дутьевые вентиляторы определялись пропорционально их мощностям, с учетом параметров рабочего тела. Затраты в системы топливоподачи, пылеприготовления, золоудаления, очистки и удаления продуктов сгорания определялись пропорционально расходу топлива. Затраты на проектирование, монтаж и строительство принимались пропорциональными стоимости основного оборудования.

3. Минимизация удельных капиталовложений при фиксированных значениях КПД нетто (Задача 3). Для решения этой задачи в задачу 2 вводится дополнительное ограничение вида:



$$\eta = \eta^z, \quad (7)$$

где η^z – фиксированное значение КПД нетто. Обозначим удельные капиталовложения в точку решения этой задачи через

$k_{yo}^{\min}$. Решение данной задачи при различных η^z , лежащих в диапазоне от $\eta_{yo}^{\min}$ до $\eta^{\max}$, позволяют построить зависимость $k_{yo}^{\min}$ от η .

Описание технологической схемы и математической модели энергоблока

Для оптимизационных исследований была принята технологическая схема энергоблока на повышенные параметры пара

(рис. 1), которая состоит из прямоточного парового котла с одним промежуточным перегревом пара (SG), паровой турбины мощ-

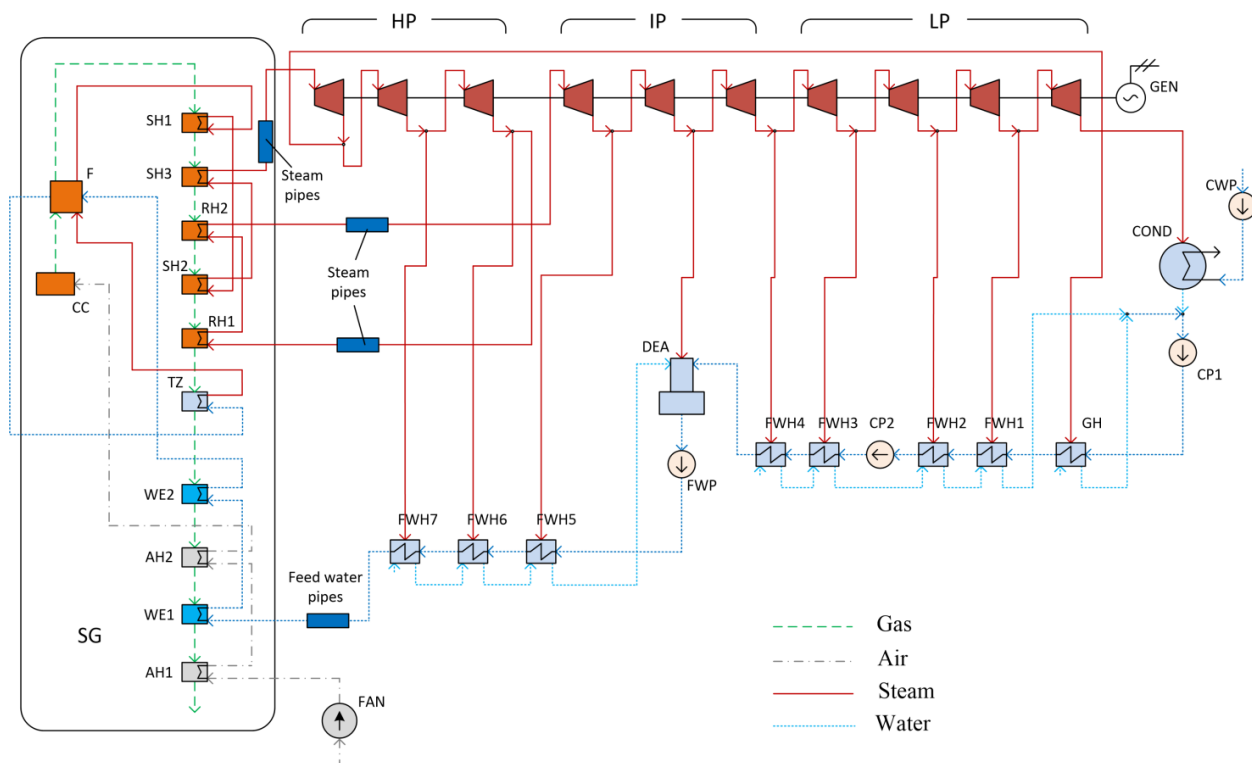


Рис. 1. Технологическая схема энергоблока на повышенные параметры пара мощностью 660 МВт:
FAN – дутьевой вентилятор; SG – прямоточный паровой котел; CC – камера сгорания парового котла; F – топка парового котла; SH1–SH3 – конвективные пароперегреватели; RH1, RH2 – промежуточные пароперегреватели; TZ – зона максимальной теплоемкости; WE1, WE2 – водяные экономайзеры; AH1, AH2 – воздухоподогреватели; HP – группа отсеков цилиндра высокого давления; IP – группа отсеков цилиндра среднего давления; LP – группа отсеков цилиндра низкого давления; GEN – электрогенератор; COND – конденсатор паровой турбины; CWP – циркуляционный насос; CP1, CP2 – конденсатные насосы; GH – сальниковый подогреватель; FWH1–FWH4 – подогреватели низкого давления; DEA – деаэратор; FWP – питательный насос; FWH5– FWH7 – подогреватели высокого давления; Steam pipes – главные паропроводы; Feed water pipes – трубопроводы питательной воды

Fig. 1. Flow diagram of the 660 MW coal-fired power unit for elevated steam parameters:
FAN – forced flow fan; SG – once-through steam generator; CC – (steam generator) combustion chamber; F – (steam generator) furnace; SH1–SH3 – convection-type superheaters; RH1, RH2 – reheaters; TZ – zone of maximum heat capacity; WE1, WE2 – water economizers; AH1, AH2 – air heaters; HP – group of units of high-pressure steam turbine; IP – group of units of intermediate-pressure steam turbine; LP – group of units of low-pressure steam turbine; GEN – electric generator; COND – steam turbine condenser; CWP – circulation water pump; CP1, CP2 – condensate pumps; GH – gland condenser; FWH1–FWH4 – low-pressure feed heaters; DEA – deaerator; FWP – feed water pump; FWH5– FWH7 – high-pressure feed heaters; steam pipes; feed water pipes



ностью 660 МВт, трех подогревателей высокого давления (FWH5-FWH7), деаэратора (DEA), четырех подогревателей низкого давления (FWH1-FWH4). Тепловая схема рассматриваемого энергоблока включает не только турбину с системой регенерации, но и детальную схему парового котла. В конвективной шахте парового котла располагается три ступени пароперегревателя (SH1-SH3), две ступени промежуточного пароперегревателя (RH1, RH2), зона максимальной теплоемкости (TZ), а также по две ступени водяного экономайзера (WE1, WE2) и воздухоподогревателя (AH1, AH2).

Для решения задач оптимизации па-

раметров угольного энергоблока была построена математическая модель рассматриваемого энергоблока, включающая 1127 задаваемых параметров, 1202 вычисляемых параметра, и, при этом для 32 параметров требуется задать начальное приближение. Построение модели энергоблока проводилось с помощью разработанного в ИСЭМ СО РАН программно-вычислительного комплекса «Система машинного построения программ» (СМПП) [7], который, на основе графически заданной технологической схемы установки и математических моделей ее элементов, строит программу расчета установки и позволяет формировать задачи оптимизации ее параметров.

Результаты оптимизационных исследований

Для энергоблока решалось три вида оптимизационных задач: максимизация КПД нетто (Задача 1), минимизация удельных капиталовложений (Задача 2) и минимизация удельных капиталовложений при фиксированных значениях КПД нетто (Задача 3). При этом в качестве независимых оптимизируемых было принято 116 параметров. Они включают: давление и температуру острого пара и пара промежуточного перегрева, расход острого пара, давление пара в отборах на регенерацию и в конденсаторе турбины, энтальпии теплоносителя на выходе из тепловоспринимающих поверхностей нагрева парового котла, толщина и шаги труб этих поверхностей и др. При оптимизации учитывалось 164 ограничений-неравенств. Они включают: ограничения на температуру и механическое напряжение металла труб теплообменников, температуру продуктов сгорания на выходе из топки котла, температуру росы для первой ступени воздухоподогревателя, концевые температурные напоры теплообменников, ограничение на влажность на выходе из последнего отсека турбины и др. Для труб поверхностей нагрева котла принимались предельные напряжения, обеспечивающие при соответствующей температуре металла стенок труб $2 \cdot 10^5$ ч работы.

Для энергоблока рассматривались следующие стали, которые используются для изготовления поверхностей нагрева котла. В конвективном пароперегревателе первой, второй, третьей ступени, промежуточном пароперегревателе второй ступени и главных паропроводах была использована высоколегированная сталь аустенитного класса марки 10X16H16B2МБР (ЭП-184) с предельной рабочей температурой 700°C, в качестве материалов для изготовления других поверхностей нагрева котельного агрегата рассматривались: теплоустойчивая сталь марки 15X1МФ, предельная температура 575°C; углеродистая сталь 20, предельная температура 450°C. Для расчета капиталовложений в энергоблок были приняты следующие значения стоимостей труб теплообменников, изготовленных из сталей: сталь 20 – 21 тыс. долл/т; 15X1МФ – 30,6 тыс. долл/т и 10X16H16B2МБР – 53 тыс. долл/т.

Был проведен ряд оптимизационных расчетов с использованием эффективного подхода к оптимизации параметров [9–13] и получена зависимость минимальных удельных капиталовложений от КПД нетто энергоблока (рис. 2). Из графика видно, что удельные капиталовложения резко возрастают по мере увеличения КПД нетто до максимального значения.

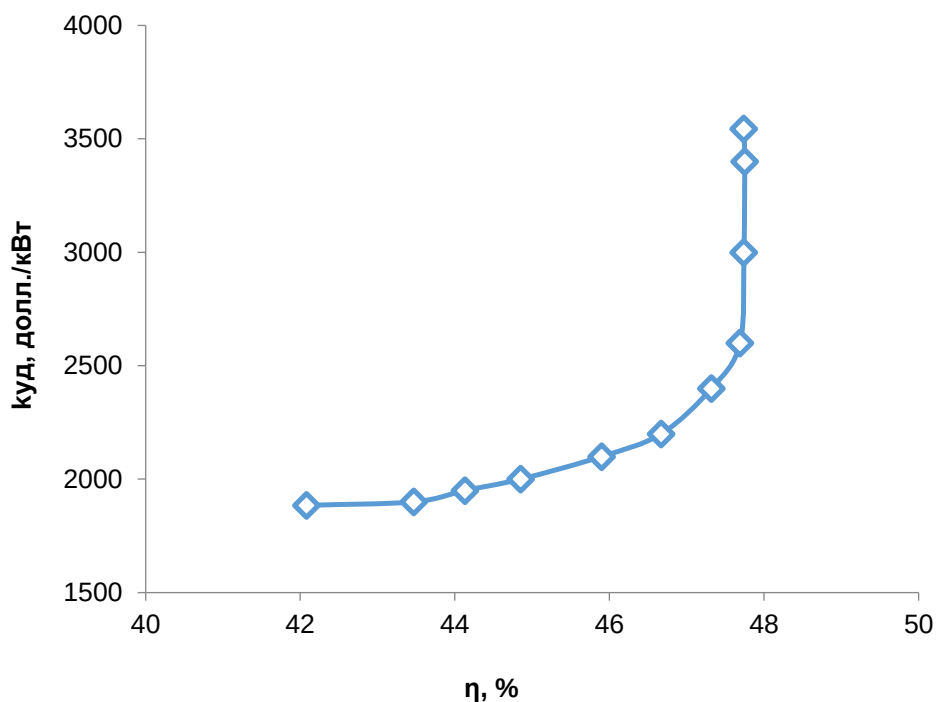


Рис. 2. Зависимость минимальных удельных капиталовложений от КПД нетто энергоблока
Fig. 2. Dependence of minimum specific investment on power unit net efficiency

Основные результаты оптимизационных расчетов
Main results of optimization calculations

Параметры	$\max \eta$	$\min k_{y0}$
КПД нетто, %	47,74	42,08
Температура уходящих газов, °C	115	147
Расход острого пара, кг/с	478,6	516,6
Давление острого пара, МПа	35,4	15,5
Температура острого пара, °C	657	613
Температура питательной воды, °C	317	262
Давление пара промежуточного перегрева, МПа	7,6	3,6
Температура пара промежуточного перегрева, °C	613	540
Температура газов на выходе из топки, °C	927	927
КПД котла, %	95,21	93,68
Полезная мощность установки, МВт	620,8	636,6
Удельный расход топлива, г у.т./кВт·ч	258	292
Расход топлива, кг/с	83,1	96,6
Мощность, МВт	662,5	669,5
Капиталовложения в установку, тыс. долл.	2201244,0	1199827,8
Удельные капиталовложения, долл/кВт	3545,7	1884,6

В таблице представлены основные результаты оптимизационных исследований энергоблока на повышенные параметры

пара мощностью 660 МВт. Из таблицы видно, что оптимальные начальные параметры энергоблока лежат в диапазоне 15,5



МПа, 613/540°C – 35,4 МПа, 657/613°C, соответствующие им КПД лежат в диапазоне 42,08–47,74% и удельные капиталовложения 1884,6–3545,7 долл/кВт. Необходимо отметить, что при оптимизации по критерию минимума удельных капиталовложений оптимальное давление острого пара оказалось достаточно низким (15,5 МПа), при этом температура острого пара принимает весьма высокое значение (613°C). Это объ-

ясняется тем, что давление острого пара существенно влияет на толщину стенок и массу металла труб теплообменных поверхностей котла. Поэтому рост давления с одной стороны позволяет поднять КПД, а с другой – увеличивает капиталовложения. Необходимо отметить, что в данном случае оптимальные технические решения можно определить лишь в результате совместной оптимизации параметров цикла и конструктивных параметров элементов.

Заключение

В данной работе были проведены оптимизационные исследования угольного энергоблока на повышенные параметры пара мощностью 660 МВт, с применением градиентных методов нелинейного математического программирования.

Получена зависимость минимальных удельных капиталовложений от КПД нетто для рассматриваемого в настоящей работе энергоблока. Полученная зависимость показала, что при приближении к точке макси-

мального КПД, на каждый процент роста КПД резко увеличиваются затраты в энергоблок.

Были получены оптимальные решения по критериям максимума КПД и минимума удельных капиталовложений.

Показано, что при оптимизации по критерию минимума удельных капиталовложений получается довольно низкое оптимальное давление острого пара при высокой температуре острого пара.

Библиографический список

1. Ligang Wang, Yongping Yang, Changqing Dong, Tatiana Morosuk, George Tsatsaronis. Parametric optimization of supercritical coal-fired power plants by MINLP and differential evolution // *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 85. P. 828–838.
2. Suresh M.V.J.J., Reddy K.S., Ajit Kumar Kolar. ANN-GA based optimization of a high ash coal-fired supercritical power plant // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. P. 4867–4873.
3. Łukasz Kowalczyk, Witold Elsner, Paweł Niegodajew, Maciej Marek. Gradient-free methods applied to optimization of advanced ultra-supercritical power plant // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 96. P. 200–208.
4. Chaojun Wang, Boshu He, Shaoyang Sun, Ying Wu, Na Yan, Linbo Yan, Xiaohui Pei. Application of a low pressure economizer for waste heat recovery from the exhaust flue gas in a 600 MW power plant // *Energy*. 2012. № 48. P. 196–202.
5. Fateme Ahmadi Boyaghchi, Hanieh Molaie. Advanced exergy and environmental analyses and multi objective optimization of a real combined cycle power plant with supplementary firing using evolutionary algorithm // *Energy*. 2015. № 93. P. 2267–2279.
6. Mostafa Baghsheikhi, Hoseyn Sayyaadi. Real-time exergoeconomic optimization of a steam power plant using a soft computing-fuzzy inference system // *Energy*. 2016. № 114. P. 868–884.
7. Клер А.М., Деканова Н.П., Щёголева Т.П., Корнеева З.Р., Лачкова Т.И. Методы оптимизации сложных теплоэнергетических установок. Новосибирск: Наука, 1993. 116 с.
8. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А., Корнеева З.Р., Маринченко А.Ю., Михеев А.В., Платонов Л.А., Потанина Ю.М., Степанова Е.Л., Медников А.С. Теплосиловые системы: Оптимизационные исследования. Новосибирск: Наука, 2005. 236 с.
9. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. An effective approach to optimizing the parameters of complex thermal power plants // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016. Vol. 23. № 2. P. 289–296.
10. ГОСТ 13109–97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный источник]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200006034> (12.08.2018)
11. Ханаев В.В., Труфанов В.В. Математическое моделирование потребителей электроэнергии при оптимизации развития электроэнергетических систем // *Электричество*. 2008. № 9. С. 2–9.
12. Ершевич В.В., Зейлигер А.Н., Илларионов Г.А. Справочник по проектированию электрических систем. 3-е изд., перераб и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.



13. Клер А.М., Деканова Н.П., Скрипкин С.К. Математическое моделирование и оптимизация в задачах

оперативного управления тепловыми электростанциями. Новосибирск: Наука, 1997. 120 с.

References

1. Ligang Wang, Yongping Yang, Changqing Dong, Tatiana Morosuk, George Tsatsaronis. Parametric optimization of supercritical coal-fired power plants by MINLP and differential evolution. *Energy Conversion and Management*. 2014, vol. 85, pp. 828–838.
2. Suresh M.V.J.J., Reddy K.S., Ajit Kumar Kolar. ANN-GA based optimization of a high ash coal-fired supercritical power plant. *Applied Energy*. 2011, vol. 88, pp. 4867–4873.
3. Łukasz Kowalczyk, Witold Elsner, Paweł Niegodajew, Maciej Marek. Gradient-free methods applied to optimization of advanced ultra-supercritical power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 96, pp. 200–208.
4. Chaojun Wang, Boshu He, Shaoyang Sun, Ying Wu, Na Yan, Linbo Yan, Xiaohui Pei. Application of a low pressure economizer for waste heat recovery from the exhaust flue gas in a 600 MW power plant. *Energy*. 2012, no. 48, pp. 196–202.
5. Fateme Ahmadi Boyaghchi, Hanieh Molaie. Advanced exergy and environmental analyses and multi objective optimization of a real combined cycle power plant with supplementary firing using evolutionary algorithm. *Energy*. 2015, no. 93, pp. 2267–2279.
6. Mostafa Baghsheikhi, Hoseyn Sayyaadi. Real-time exergoeconomic optimization of a steam power plant using a soft computing-fuzzy inference system. *Energy*. 2016, no. 114, pp. 868–884.
7. Kler A.M., Dekanova N.P., Shchegoleva T.P., Korneeva Z.R., Lachkova T.I. *Metody optimizatsii slozhnykh teploenergeticheskikh ustanovok* [Optimization methods of complex thermal power plants]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1993, 116 p. (In Russian)
8. Kler A.M., Dekanova N.P., Tyurina E.A., Korneeva

- Z.R., Marinchenko A.Yu., Mikheev A.V., Platonov L.A., Potanina Yu.M., Stepanova E.L., Mednikov A.S. *Teplosilovye sistemy: Optimizatsionnye issledovaniya* [Thermal power systems: Optimization studies]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005, 236 p. (In Russian)
9. Kler. A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. An effective approach to optimizing the parameters of complex thermal power plants. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016, vol. 23, no. 2, pp. 289–296.
10. GOST 13109–97 *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [GOST 13109-97 Electrical energy. Compatibility of technical means electromagnetic. Standards of quality of electric energy in power supply systems of General purpose]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006034> (12.08.2018)
11. Hanaev V.V., Trufanov V.V. Mathematical modeling of electric power consumers at optimization of electric power systems development. *Elektrichestvo* [Electricity], 2008, no. 9, pp. 2–9. (In Russian)
12. Ershevich V.V., Zejliger A.N., Illarionov G.A. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh sistem* [Handbook of electrical system design]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985, 352 p. (In Russian)
13. Kler A.M., Dekanova N.P., Skripkin S.K. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya v zadachah operativnogo upravleniya teplovymi elektro-stanciyami* [Mathematical modeling and optimization in problems of operational management of thermal power plants]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1997, 120 p. (In Russian)

Критерии авторства

Клер А.М., Жарков П.В., Епишкин Н.О. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клер Александр Матвеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теплосиловых систем, e-mail: kler@isem.irk.ru

Жарков Павел Валерьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела теплосиловых систем, e-mail: isem777@mail.ru

Епишкин Николай Олегович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела теплосиловых систем, e-mail: k0l9l@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr M. Kler, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Thermal Energy Systems Department, e-mail: kler@isem.irk.ru

Pavel V. Zharkov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Thermal Energy Systems Department, e-mail: isem777@mail.ru

Nikolay O. Epishkin, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher of the Thermal Energy Systems Department, e-mail: k0l9l@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.21+658.26:502.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-115-123>

Обеспечение экологически чистого энергоснабжения при развитии тепловых электрических станций региона

© Г.Г. Лачков, Б.Г. Санеев

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

Резюме: Использование угля в качестве основного топлива на тепловых электростанциях, значительный износ котельного оборудования на многих из них обуславливают актуальность учета экологических аспектов при организации рационального энергоснабжения потребителей. Отсюда цель настоящей работы – предложить методический подход для планирования развития тепловых электростанций региона с позиции экологически чистого энергоснабжения. Предлагаемый подход ориентирован на использование наилучших доступных технологий, основан на экспертных оценках и методике оценки эффективности инвестиционных проектов. Дана характеристика объекта исследования. Изложен многоэтапный алгоритм планирования развития ТЭС региона с позиций экологически чистого энергоснабжения в перспективе, встраиваемый в систему экономико-математических моделей для прогнозирования развития топливно-энергетического комплекса. Предложен методический подход к планированию развития тепловых электростанций региона, обеспечивающий экологически чистое энергоснабжение в перспективе.

Ключевые слова: тепловые электростанции, развитие, наилучшие доступные технологии, экологически чистое энергоснабжение

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках регионального проекта № 17-48-380002 p_a.

Информация о статье: Дата поступления 03 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 22 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Лачков Г.Г., Санеев Б.Г. Обеспечение экологически чистого энергоснабжения при развитии теплоэлектростанций региона. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):115–123. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-115-123.

Providing environmentally friendly energy supply when developing regional TPP

Georgy G. Lachkov, Boris G. Saneev

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: Use of coal as a main fuel at thermal power plants (TPP) and significant wear of TPP boiler equipment cause the relevance of environmental aspect consideration when organizing rational energy supply to consumers. Hence, the purpose of this study is to propose a methodical approach for planning the development of regional thermal power plants in terms of environmentally friendly energy supply. The proposed approach is oriented at using the best available technologies, based on expert appraisals and estimation methods of investment project efficiency. The object of research is described. A multistage algorithm of regional TPP development planning is presented in terms of environmentally friendly long-term energy supply. This algorithm is designed to be built in the system of economic and mathematical models for predicting the development of the fuel and energy complex. A methodical approach ensuring environmentally friendly long-term energy supply has been proposed for planning the development of regional thermal power plants.

Keywords: thermal power plants (TPP), development, best available technologies, environmentally friendly energy supply

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the government of the Irkutsk region within the framework of the regional project no. 17-48-380002 p_a.

Information about the article: Received December 03, 2018; accepted for publication January 22, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Lachkov G.G., Saneev B.G. Providing environmentally friendly energy supply when developing regional TPP. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):115–123. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-115-123.



Введение

Основные вводы мощностей тепловых электростанций (ТЭС) в регионах страны осуществлялись в 60-е годы прошлого столетия. В результате, например, в Иркутской энергосистеме от 54 до 65% оборудования теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) к настоящему времени отработало более 30 лет [1]. В связи с этим большая часть основного генерирующего оборудования электростанций имеет значительный износ и требует особого контроля его экологических характеристик, в частности валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Кроме износа основного оборудования причинами превышения на ТЭЦ валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу являются:

- ухудшение качества сжигаемого топлива по содержанию золы, серы, азота;
- увеличение объемов сжигания на ряде ТЭЦ непроектных углей, имеющих худ-

шие экологические характеристики в отличие от проектного угля;

- увеличение выработки электроэнергии на ТЭЦ при снижении выработки электроэнергии на гидроэлектростанциях в маловодные периоды;

- увеличение общего расхода сжигаемого топлива на ТЭЦ в связи с увеличением выработки электроэнергии и отпуска теплоты пропорционально росту потребности.

Экологическим вопросам в сфере производства энергии на ТЭС уделяется достаточно большое внимание [2–7 и др.], однако в большей мере это касается действующих электростанций и энергоустановок.

В статье, применительно к Иркутской области, излагается подход к планированию развития ТЭС региона с позиций экологически чистого энергоснабжения в перспективе.

Объект исследования

На территории Иркутской области действует 15 крупных ТЭЦ суммарной установленной мощностью 4160,7 МВт, на которых по данным Росстата в 2016 г. было выработано 11,9 млрд кВт·ч электроэнергии и 21,0 млн Гкал тепловой энергии. Для производства такого количества энергии на этих ТЭЦ было сожжено более 7,5 млн т у.т. топлива, в том числе: угля – 6,0 млн т у.т., мазута – 0,02 млн т у.т., прочих видов топлива 1,5 млн т у.т.

Объем выбросов от ТЭЦ региональной энергосистемы в 2015 г. составил 278,9 тыс. т, в том числе: диоксидов серы – 186,5 тыс. т; оксидов азота – 41,1 тыс. т; твердых веществ – 50,8 тыс. т [8]. Выбросы загрязняющих веществ по некоторым ТЭЦ Иркутской области (по данным ИТС 38-2017¹) представлены в таблице.

При эксплуатации действующих ТЭС основными способами снижения вредного воздействия на окружающую среду являются:

- сжигание проектного (или близкого к нему по характеристикам) топлива и оптимизация режимов горения в топках котлов;
- использование малотоксичных горелок с уменьшенным образованием оксидов азота;
- применение высокоэффективных устройств улавливания твердых частиц из дымовых газов;
- внедрение автоматизированных систем непрерывного контроля выбросов вредных веществ в атмосферу;
- применение высокоэффективных установок очистки сточных вод;
- использование оборотных систем

¹Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Сжигание топлива на крупных установках с целью производства энергии» (ИТС 38-2017). Введен в действие 01.07.2018 г. / Information and technical reference book on the best available technologies “Fuel combustion in large plants for energy production” (ITS 38-2017). Brought into force in January 7, 2018



Выбросы загрязняющих веществ в 2015 г. по некоторым ТЭЦ Иркутской области, т
Pollutant emissions in 2015 by some thermal power plants of the Irkutsk region, t

Наименование	Всего	Твердые вещества	Диоксид серы	Оксиды азота (в пересчете на NO ₂)	Оксид углерода
Иркутская ТЭЦ-10	57678	8005	41657	7995	21
Ново-Иркутская ТЭЦ	56349	5502	41869	8913	65
Иркутская ТЭЦ-9	50794	7545	37498	5740	11
Ново-Зиминская ТЭЦ	23533	2495	18816	2194	28
Иркутская ТЭЦ-11	21869	4112	15055	2691	11
Усть-Илимская ТЭЦ	20048	9109	7008	3915	17
Иркутская ТЭЦ-1	18573	4344	11940	2286	4

гидрозолоудаления и технического водоснабжения;

– снижение потерь энергии в сетях и на собственные нужды.

Сжигание непроектного топлива в котлах ТЭС приводит к изменению температурного режима, технико-экономических показателей работы и выбросов вредных веществ в атмосферу. В процессе работы ТЭС топливо подается в котел и для его сжигания сюда же подается окислитель – воздух, содержащий кислород. В результате химической реакции сгорания, при которой углерод С топлива превращается в оксиды CO₂ и CO, водород H₂ – в пары воды H₂O, сера S – в оксиды SO₂ и SO₃ и т.д., образуются продукты сгорания топлива – смесь различных газов высокой температуры. Для полного сжигания 1 кг топлива требуется около 10–15 кг воздуха. В зависимости от состава и теплоты сгорания топлива в котел подается то или иное количество воздуха. Путем изменения соотношения количества топлива и воздуха, подаваемого в котел, оптимизируются режимы горения в топке.

Эффективной мерой при реконструкции действующих котлов является внедрение малотоксичных горелок, способствующих более эффективному использованию воздуха, забираемого из атмосферы для процесса сжигания. При этом не только уменьшается количество образующихся оксидов азота, но и повышается КПД угольной электростанции.

Применение высокоэффективных устройств улавливания твердых частиц из

дымовых газов (электрофильтров, скрубберов) позволяет в значительной мере сократить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. КПД современных установок сероочистки и электрофильтров может достигать 99,9% [6].

Внедрение автоматизированных систем непрерывного контроля выбросов вредных веществ в атмосферу также является эффективной мерой улучшения экологических характеристик ТЭС. С их помощью можно оперативно отслеживать, не превышен ли уровень выброса в атмосферу вредных веществ на ТЭС, регламентированный требованиями законодательства в области экологии и охраны окружающей среды. Измерительные приборы устанавливаются на газоходы котлоагрегатов. Приборы выдают информацию о массовой концентрации загрязняющих веществ в уходящих газах – оксида углерода, оксидов азота, диоксида серы, твердых частиц, а также объемной доли кислорода и параметров отходящих газов. Это позволяет оперативно повлиять на работу оборудования, если объем каких-либо веществ изменился в сторону ухудшения, а именно – повысить или понизить количество воздуха, подаваемого в котлоагрегаты и отрегулировать режим горения в топках котлов. Подобное оборудование уже устанавливается на отечественных ТЭС, например, на Челябинской ТЭЦ-2 [9], Магаданской ТЭЦ и Аркагалинской ГРЭС [10].

Для очистки сточных вод на ТЭС используются очистные сооружения – станции



физико-химической очистки и станции механической очистки.

Повторное использование воды в системах гидрозолоудаления и технического водоснабжения за счет применения оборотных систем позволяет избежать дополнительного вредного воздействия ТЭС на окружающую среду.

За счет снижения потерь в сетях и

расходов энергии на собственные нужды ТЭС сокращается количество сжигаемого в котлах топлива и, соответственно, уменьшаются выбросы и сбросы вредных веществ.

Очевидно, что вопрос экологически чистого энергоснабжения потребителей является актуальным не только на текущий момент, но и на перспективу – при планировании развития ТЭС.

Предлагаемый подход

Главным направлением обеспечения экологически чистого энергоснабжения при планировании развития ТЭС представляется ориентация на инновационные, экологически чистые и энергоэффективные технологии производства электрической и тепловой энергии.

В связи с ФЗ «Об охране окружающей среды», одним из основных принципов охраны окружающей среды является обеспечение снижения негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в соответствии с нормативами в области охраны окружающей среды, которого можно достигнуть на основе использования наилучших доступных технологий с учетом экономических и социальных факторов.

Под наилучшей доступной технологией (НДТ) понимается технология производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды, при условии наличия технической возможности ее применения. Применение НДТ направлено на комплексное предотвращение и (или) минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. НДТ должны обеспечить снижение негативного воздействия на окружающую среду при сохранении рентабельности и потенциала развития промышленности.

Внесенные в закон «Об охране окружающей среды» поправки, связанные с НДТ, предполагают, что к 2025 г. российская промышленность перейдет на новую форму

экологического регулирования. Внедрение принципов НДТ в России планируется начать в 2019 г. на основе профильных справочников.

В настоящее время с учетом имеющихся в РФ технологий, оборудования, сырья, других ресурсов, а также с учетом климатических, экономических и социальных особенностей страны разрабатываются информационно-технические справочники (ИТС) по НДТ (всего их будет 48). В части ТЭК будут действовать 7 справочников НДТ, в том числе ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии».

Известно, что наиболее экологически чистыми технологиями получения электрической и тепловой энергии путем сжигания органического топлива являются ТЭС, работающие на природном газе. К примеру, перевод котла типа БКЗ-210-140-7 Хабаровской ТЭЦ-1 с угля на природный газ позволил снизить годовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу на 1670 т (или на 15%), в том числе оксида азота – на 109,7 т, диоксида серы – на 592,5 т, оксида углерода – на 15,5 т, твердых веществ – на 952,9 т. Использование газового топлива поможет также сократить золошлаки и сэкономить ресурс золоотвала электростанции. Предыдущие семь котлоагрегатов Хабаровской ТЭЦ-1 газифицированы в период с 2006 по 2016 годы. За это время выбросы загрязняющих веществ в атмосферу сократились в 2,5 раза, образование золошлаковых отходов – вчетверо [11].

Наиболее эффективными из газовых ТЭС являются ПГУ ТЭС, работающие по па-



рогазовому циклу, КПД которых достигает 60–61% [12], а в перспективе может повыситься до 63–64% [13, 14].

Среди угольных технологий получения энергии предпочтительными являются энергоустановки на базе котлов:

- с циркулирующим кипящим слоем (в топках с кипящим слоем в 8–10 раз уменьшается выброс оксидов серы и в 2–3 раза оксидов азота, а КПД энергоустановки увеличивается до 40%);

- с кольцевой топкой (позволяет в 1,5–2 раза снизить выбросы оксидов азота). Единственный в практике мирового энергомашиностроения котел с уникальной кольцевой топкой и самый крупный в стране котлоагрегат барабанного типа – котел БКЗ-820 работает на Ново-Иркутской ТЭЦ [15];

- со сверхкритическими (давление более 24,5 МПа, температура свыше 540°C) и суперсверхкритическими (давление более 28 МПа и температура более 600°C) параметрами пара (КПД энергоустановки достигает 45%).

Предлагаемый подход к обеспечению экологически чистого энергоснабжения при планировании развития ТЭС региона представляет собой поэтапный анализ как действующих, так и предполагаемых новых ТЭС с использованием НДТ сжигания топлива (рис. 1).

Предлагаемый подход может быть реализован в системе моделей для исследования перспективного развития региональных топливно-энергетических комплексов (ТЭК), разработанной в ИСЭМ СО РАН [16] (рис. 2).

Первым этапом предлагаемого подхода является формирование информационной базы ТЭС региона с набором основных характеристик, необходимых для последующего анализа, таких как: наименование, местонахождение, установленная мощность (электрическая и тепловая), вид и сорт используемого топлива (основного и резервного), тип, количество и основные технико-экономические характеристики действующего генерирующего оборудования, перечень и основные технико-экономические характеристики НДТ в области

производства электроэнергии и тепла на ТЭС и т.д.

На втором этапе экспертным путем решается принципиальный вопрос – существует ли на данном временном этапе реальная возможность использования газового топлива для рассматриваемой ТЭС? При этом для крупных электростанций имеется в виду сетевой природный газ. Решение вопроса зависит от того, осуществляется ли в принципе газификация в регионе, имеются ли необходимые газотранспортная инфраструктура и ресурсы газа для рассматриваемой ТЭС.

На третьем этапе анализируется возрастной состав котельного оборудования ТЭС, в результате чего выявляются энергоблоки и электростанции, выработавшие к данному временному этапу свой парковый ресурс. Такие объекты должны быть рассмотрены на предмет возможной реконструкции или демонтажа.

На четвертом этапе для действующих и предполагаемых новых ТЭС в зависимости от результатов второго и третьего этапов решаются задачи оценки экономической эффективности того или иного мероприятия, для чего в каждом случае строится экономическая модель на основе методики оценки эффективности инвестиционных проектов [17].

Исключением является сочетание условий, когда для действующей угольной ТЭС на данном временном этапе нет реальной возможности использовать природный газ и ее котлы не выработали свой парковый ресурс. В этом случае в модели ТЭК сохраняются прежние характеристики рассматриваемой ТЭС (4.1).

В случае, когда котлы действующей угольной ТЭС выработали свой парковый ресурс, и нет возможности ее перевода на природный газ, решается задача оценки экономической эффективности реконструкции котлов данной ТЭС с использованием НДТ сжигания угля в целях производства энергии (4.2). В зависимости от полученного результата выполняется следующее действие: передача информации в модель ТЭК о демонтаже старой ТЭС (5.1) или передача



в модель ТЭК новых характеристик реконструируемой угольной ТЭС (5.2).

Если на данном временном этапе котлы действующей угольной ТЭС не вырабатывали свой парковый ресурс и есть реальная возможность ее подключения к газотранспортной системе, то решается задача оценки экономической эффективности модернизация данной угольной ТЭС с переводом котлов на газ (4.4). В зависимости от полученного результата в модели ТЭК осуществляется сохранение прежних характеристик действующей угольной ТЭС (5.5) или ввод новых характеристик модернизируемой ТЭС (5.6).

В случае, когда рассматривается вопрос о необходимости сооружения на данном временном этапе новой ТЭС, и нет возможности использования в качестве топлива для нее природного газа, решается задача оценки экономической эффективности

сооружения новой угольной ТЭС с использованием НДТ сжигания угля в целях производства энергии (4.3). В зависимости от полученного результата в модель ТЭК передается информация о нулевом вводе новой угольной ТЭС (5.3) либо характеристики новой угольной ТЭС (5.4).

В случае, когда рассматривается вопрос о необходимости сооружения на данном временном этапе новой ТЭС, и есть реальная возможность использования в качестве топлива для нее природного газа, решается задача оценки экономической эффективности сооружения новой газовой ТЭС с использованием НДТ сжигания газа в целях производства энергии (4.5). В зависимости от полученного результата производится передача в модель ТЭК информации о нулевом вводе новой газовой ТЭС (5.7) либо характеристик новой газовой ТЭС (5.8).

1. Формирование информационной базы ТЭС								
2. Существует ли на данном этапе реальная возможность использования газового топлива для данной ТЭС?								
Нет					Да			
3. Выработан ли ресурс котлов ТЭС?								
Нет	Да				Нет		Да	
4.1. Сохранение в модели ТЭК прежних характеристик действующей угольной ТЭС	4.2. Эффективна ли экономически реконструкция данной угольной ТЭС с использованием НДТ?		4.3. Эффективно ли экономически сооружение новой угольной ТЭС с использованием НДТ?		4.4. Эффективна ли экономически модернизация данной угольной ТЭС с переводом котлов на газ?		4.5. Эффективно ли экономически сооружение новой газовой ТЭС с использованием НДТ?	
	Нет	Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет	Да
	5.1. Передача информации в модель ТЭК о демонтаже старой ТЭС	5.2. Передача в модель ТЭК новых характеристик реконструируемой угольной ТЭС	5.3. Передача информации в модель ТЭК о нулевом вводе новой угольной ТЭС	5.4. Передача в модель ТЭК характеристик новой угольной ТЭС	5.5. Сохранение в модели ТЭК прежних характеристик действующей угольной ТЭС	5.6. Передача в модель ТЭК новых характеристик модернизируемой ТЭС	5.7. Передача информации в модель ТЭК о нулевом вводе новой газовой ТЭС	5.8. Передача в модель ТЭК характеристик новой газовой ТЭС

Рис. 1. Поэтапная схема обеспечения экологически чистого энергоснабжения при планировании развития ТЭС
Fig. 1. Stage-by-stage scheme to provide environmentally friendly energy supply when planning TPP development

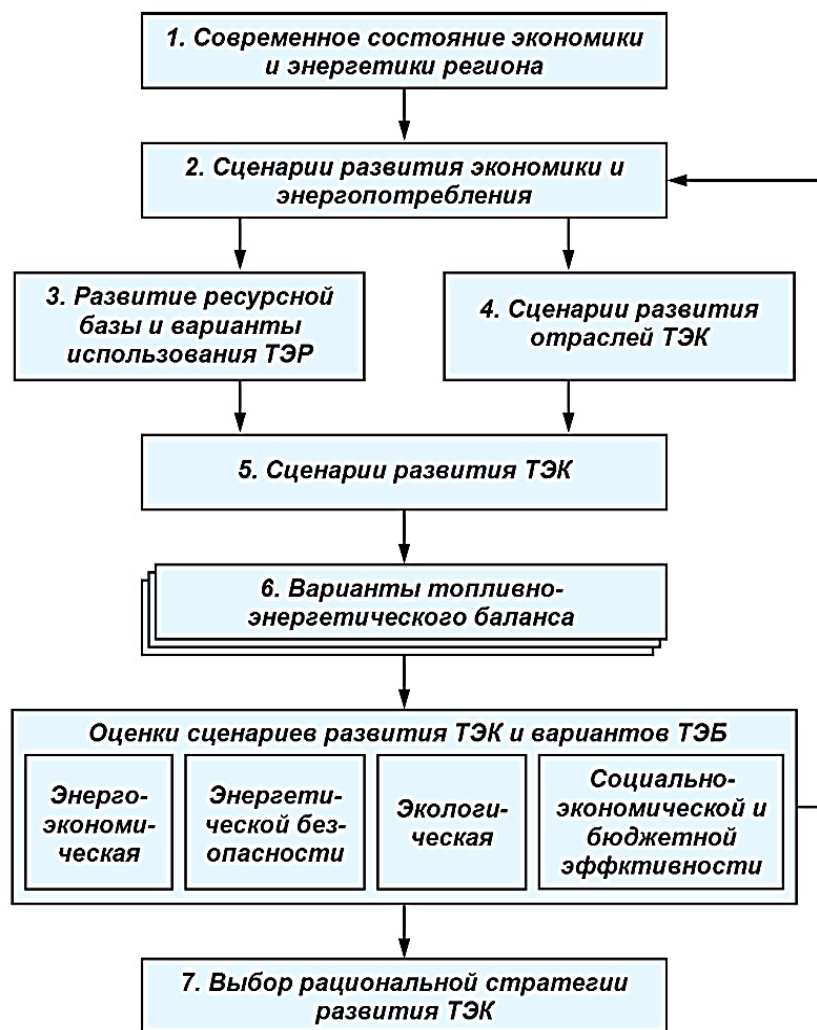


Рис. 2. Структурная схема исследования развития региональных ТЭК
Fig. 2. Block diagram for the research of regional fuel and energy complex development

В процессе решения глобальной задачи оптимизации развития ТЭК региона отдельные технические параметры (установленная мощность, выработка энергии, рас-

ход топлива и т.п.) рассматриваемых ТЭС могут быть скорректированы, а в зависимости от этого могут уточняться и их экологические характеристики.

Заключение

Использование угля в качестве основного топлива на тепловых электростанциях, большой износ котельного оборудования на многих из них обуславливают значительный уровень загрязнения окружающей среды от их деятельности. К примеру, объем выбросов от ТЭЦ Иркутской энергосистемы в 2015 г. составил 278,9 тыс. т, в том числе: диоксидов серы – 186,5 тыс. т; оксидов азота – 41,1 тыс. т; твердых веществ – 50,8 тыс. т.

Это обуславливает актуальность учета экологических аспектов при организации рационального энергоснабжения потребителей. Следует признать, что экологическим вопросам в сфере производства энергии на ТЭС уделяется достаточно большое внимание, однако в большей мере это касается действующих электростанций и энергоустановок.

Предложенный в статье подход, ориентированный на использование наилучших



доступных технологий, основанный на экспертных оценках и методике оценки эффективности инвестиционных проектов, представляющий собой многоэтапный алгоритм планирования развития ТЭС, встраиваемый в систему экономико-математических моделей для прогнозирования развития топливно-энергетического комплекса, позво-

ляет планировать развитие ТЭС региона с позиций экологически чистого энергоснабжения потребителей в перспективе.

Практическая апробация предлагаемого подхода предполагается на следующем этапе работы, выполняемой в рамках регионального проекта РФФИ и Правительства Иркутской области.

Библиографический список

1. Санеев Б.Г., Агафонов Г.В. Топливно-энергетический комплекс Иркутской области: современное состояние и перспективы развития. М.: «ЭНЕРГИЯ», 2013. 304 с.
2. Санеев Б.Г., Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Учет региональных особенностей в методах оценки воздействия энергетики на природную среду // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 6. С. 79–85.
3. Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Maysyuk E.P., Tuguzova T.F. Introduction of environmental measures in the heat power industry of the central ecological zone of the baikal natural territory // Ecology and Industry of Russia. 2018. Vol. 22. No. 7. P. 20–25.
4. Котлер В.Р. Специальные топки энергетических котлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 104 с.
5. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: информационный сборник / Под общ. ред. В.Я. Путилова. М.: Изд. Дом МЭИ, 207. 388 с.
6. Росляков П.В. Современные воздухоохранные технологии на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 46–62.
7. Котлер В.Р., Рыжий И.А. Достижение на угольных котлах европейских норм по выбросам NOx без очистки дымовых газов // Энергетик. 2014. № 10. С. 39–41.
8. Информация о выбросах загрязняющих веществ, оказывающих негативное влияние на окружающую среду и мероприятиях по их сокращению на следующий год [Электронный ресурс]. URL: <http://www.irkutskenergo.ru/qa/6485.html> (25.08.2018).
9. Челябинская ГРЭС станет одним из пилотных проектов по внедрению автоматического контроля промышленных выбросов в атмосферный воздух [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosteplo.ru/news/>

- 2018/02/19/1518977910-chelyabinskaya-grehs-stanet-odnim-iz-pilotnyh-proektov (15.08.2018).
10. На Магаданской ТЭЦ начали применять автоматические газоанализаторы для контроля уровня выброса вредных веществ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosteplo.ru/news.php?zag=1480355824> (15.08.2018).
11. Восьмой по счету котлоагрегат Хабаровской ТЭЦ-1 переведен на газ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rushydro.ru/press/holding-news/105015.html> (20.08.2018).
12. Ольховский Г.Г. Парогазовые установки: вчера, сегодня, завтра (обзор) // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 38–45.
13. Chiesa P., Macchi E. A thermodynamic analysis of different options to break 60% electric efficiency in CC power plants // J. Eng. Gas Turbines Power. 2004. V. 126. P. 770–785.
14. Gulen S.C. Looking beyond air cooling for 64 or 65% net efficiency // Gas Turbine World. July-Aug. 2014. P. 33–35.
15. Компания «Иркутскэнерго» запатентовала способ работы единственного в России котла с кольцевой топкой на разных режимах [Электронный ресурс]. URL: <http://www.irkutskenergo.ru/news/3870.html> (25.08.2018).
16. Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Агафонов Г.В. Методы и модели разработки региональных энергетических программ. Новосибирск: Наука, 203. 140 с.
17. Косов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. М-во экон. РФ, М-во фин. РФ, ГК по строительству, архитектуре и жилищной политике. М.: ОАО «НПО Изд-во»; «Экономика», 2000. 421 с. / перевод

References

1. Saneev B.G., Agafonov G.V. *Toplivno-energeticheskii kompleks Irkutskoy oblasti: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Fuel and energy complex of the Irkutsk region: current state and development prospects]. Moscow: ENERGY Publ., 2013, 304 p. (In Russian)
2. Saneev B.G., Maysyuk E.P., Ivanova I.Y. Considering of regional features in the assessment methods of power engineering impact on environment. *Izvestiya RAN. En-*

- ergetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2016, no. 6, pp. 79–85. (In Russian)
3. Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Maysyuk E.P., Tuguzova T.F. Introduction of environmental measures in the heat power industry of the central ecological zone of the Baikal natural territory // Ecology and Industry of Russia. 2018, vol. 22, no. 7, pp. 20–25.
4. Kotler V.R. *Specialnye topki energeticheskikh kotlov* [Special boiler furnaces of power-generating boilers].



Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, 104 p. (In Russian)

5. *Sovremennye prirodohrannye tehnologii v elektroenergetike / Pod obzhey redakcyey V.Y. Putilova*. [Modern environmental protection technologies in electric power industry]. Moscow: MEI Publ., 207, 388 p. (In Russian).

6. Roslyakov P.V. *Sovremennye vozdukhohrannye tehnologii na teplovyykh elektrostantsiyakh* [Modern air protection technologies at thermal power plants (review)]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2016, no. 7, pp. 46–62. (In Russian)

7. Kotler V.R., Ryzchik I.A. Achieving European standards in NO_x emissions on coal-fired boilers without flue gas purification. *Energetik* [Power and Electrical Engineering], 2014, no. 10, pp. 39–41. (In Russian)

8. *Informatsiya o vybrosakh zagryaznyayushchikh veshchestv, okazyvayushchikh negativnoye vliyaniye na okruzhayushchuyu sredyu i meropriyatiya po ih sokracheniyu na sleduyushchiy god* [Information on pollutant emissions having an adverse effect on the environment and measures to reduce emissions for the next year]. Available at: <http://www.irkutskenergo.ru/qa/6485.html> (accessed 25 August 2018). (In Russian)

9. *Chelyabinskaya GRES stanet odnim iz pilotnykh proyektov po vnedreniyu avtomaticheskogo kontrolya promyshlennyykh vybrosov v atmosferyi vozdukh* [Chelyabinsk State District Power Plant will become one of the pilot projects to introduce automatic control of industrial emissions into the atmosphere]. Available at: <http://www.rosteplo.ru/news/2018/02/19/1518977910-chelyabinskaya-grehs-stanet-odnim-iz-pilotnykh-proektov> (accessed 15 August 2018). (In Russian)

10. *Na Magadanskoj TEC nachali primenyat avtomaticheskiye gazoanalizatory dlya kontrolya urovnya vybrosov vrednykh veshchestv* [Automatic gas analyzers are introduced at the Magadan CHPP to control the level of pollutant emissions]. Available at:

<http://www.rosteplo.ru/news.php?zag=1480355824> (accessed 15 August 2018). (In Russian)

11. *Vosmoy po schetu kotloagregat Habarovskoy TEC-1 pereveden na gaz* [The eighth boiler at the Khabarovsk CHPP-1 has switched to gas]. Available at: <http://www.rushydro.ru/press/holding-news/105015.html> (accessed 20 August 2018).

12. Olhovskiy G.G. Combined cycle plants: yesterday, today and tomorrow (review). *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2016, no. 7, pp. 38–45. (In Russian)

13. Chiesa P., Macchi E. A thermodynamic analysis of different options to break 60% electric efficiency in CC power plants. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 2004, vol. 126, pp. 770–785.

14. Gulen S.C. Looking beyond air cooling for 64 or 65% net efficiency // *Gas Turbine World*. 2014, July–August, pp. 33–35.

15. *Companiya «Irkutskenergo» zapatentovala sposob raboty edinstvennogo v Rossii kotla s kolcevoy topkoy na raznykh rezhimakh* [IrkutskEnergo has patented an operation method of the only Russian boiler with a ring fire chamber at different regimes]. Available at: <http://www.irkutskenergo.ru/news/3870.html> (accessed 25 August 2018). (In Russian)

16. Saneev B.G., Sokolov A.D., Agafonov G.V. *Metody i modeli razrabotki regionalnykh energeticheskikh programm* [Methods and models of regional energy programs development]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2003, 140 p. (In Russian)

17. Kosov V.V., Livshits V.N., Shakhnazarov A.G. *Metodicheskie rekomendatsyi po otsenke effektivnosti investitsionnykh proyektov: (vtoraya redaktsiya)* [Guidelines on assessment of investment project efficiency (second edition)]. Ministry of Economy of RF, Ministry of Finances, State Committee on Construction, Architecture and Housing policy; leaders of the team of authors. Moscow: Ekonomika Publ., 2000, 421 p. (In Russian)

Критерии авторства

Лачков Г.Г., Санеев Б.Г. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Lachkov G.G., Saneev B.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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лачков Георгий Георгиевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: g.lachkov@isem.irk.ru

Санеев Борис Григорьевич, доктор технических наук, профессор, e-mail: saneev@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgy G. Lachkov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: g.lachkov@isem.irk.ru

Boris G. Saneev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: saneev@isem.irk.ru



Использование термодинамических пределов в энергетических исследованиях

© В.С. Степанов, Т.Б. Степанова, Н.В. Старикова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: В статье рассмотрены возможности использования термодинамических показателей идеальных (подобных идеальной машине Карно) и идеализированных аналогов для исследования реальных процессов в различных отраслях экономики. К таким показателям относятся идеальные и идеализированные коэффициенты полезного действия, теоретические и минимально необходимые затраты энергии (эксергии) на реализацию процесса. Приведена методика их определения, а также показано, как они могут быть использованы для оценки термодинамической эффективности процесса, теоретического потенциала и резервов энергосбережения при его совершенствовании, для прогнозирования энергетических затрат на долгосрочную перспективу (более 20 лет). Разработанные методы проиллюстрированы примерами исследования производств металлов и некоторых неорганических и органических веществ. Выполнен анализ тенденций в изменении удельных затрат энергии на производство алюминия методом Холла-Эру за весь период его освоения и использования. Приведенные графики подтверждают, что энергетические затраты процесса в настоящее время асимптотически приближаются к затратам его идеального аналога (реальный коэффициент полезного действия – к коэффициенту полезного действия идеального процесса). Это означает, что процессу следует искать замену, т.е. переходить к новой технологии получения алюминия. Процедура расчета минимально необходимых и предельных (максимальная степень идеализации процесса) затрат энергии (эксергии) на продукт показана на примере производства металлов по разным технологиям ряда химических веществ. Последующая экстраполяция коэффициента полезного действия этих процессов дает возможность прогнозировать объем и структуру их энергопотребления на долгосрочную перспективу без наличия достоверных статистических данных. Такие прогнозы дают достаточно точные результаты, поскольку базируются на фундаментальных законах термодинамики. Привлечение второго начала термодинамики с использованием понятия «эксергия» в эти исследования еще более повышает уровень достоверности и значимости полученных результатов.

Ключевые слова: термодинамические методы, эксергетический анализ, идеальные и идеализированные коэффициенты полезного действия, металлургические процессы, переход к новым технологиям, долгосрочное прогнозирование энергопотребления

Информация о статье: Дата поступления 25 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 29 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Использование термодинамических пределов в энергетических исследованиях. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):124–136. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-124-136.

Use of thermodynamic limits in energy researches

Vladimir S. Stepanov, Tatiana B. Stepanova, Natalia V. Starikova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The article considers the possibility of using thermodynamic indicators of ideal (similar to the Carno heat machine) and idealized analogs to study real processes in various sectors of economy. These indicators include ideal and idealized efficiency coefficients, theoretical and minimum required energy/exergy costs of process implementation. The methods of their determination are presented and it is shown how these indicators can be used to estimate the thermodynamic efficiency of the process, theoretical potential and resources of energy saving when improving it and making long-term predictions (more than 20 years) of energy costs. The developed methods are illustrated by the examples of researches of metals and some inorganic and organic substances production. The analysis is given to the tendencies in the change of specific energy consumption for aluminium production by the Hall-Heroult method during the whole period of its use. The given graphs prove that process current energy costs are asymptotically close to the costs of its ideal analog (real efficiency is close to the efficiency of the ideal process). This means that the process should be replaced, i.e. it is necessary to switch to a new aluminum production technology. The calculation procedure of the minimum required and maximum (maximum degree of process idealization) energy (exergy) costs per product is shown by the example of metal and chemicals production by different technologies. The subsequent extrapolation of the efficiency of these processes allows to make a long-term prediction of the volume and structure of their energy consumption in the absence of reliable statistics.



Such forecasts provide quite accurate results, since they are based on the fundamental laws of thermodynamics. The involvement of the second principle of thermodynamics using the concept of "exergy" in these studies further increases the level of reliability and significance of the results obtained.

Keywords: thermodynamic methods, exergy analysis, ideal and idealized efficiency coefficients, metallurgical processes, transition to new technologies, long-term forecasting of energy consumption

Information about the article: Received December 25, 2018; accepted for publication January 29, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Use of thermodynamic limits in energy researches. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):124–136. (In Russ.) DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-124-136>.

Введение

Все процессы, протекающие в природе и различного рода технических системах, являются следствием преобразования одних видов энергии в другие. Любые материальные изменения вторичны, поскольку они вызваны изменениями энергетического состояния системы. Таким образом, если в основе любых процессов лежат энергетические изменения, то именно их энергетику

необходимо тщательно изучать и анализировать. Разработка методов для проведения таких исследований является задачей термодинамики, которая позволяет ответить на вопросы: с какими энергетическими затратами идет процесс, насколько они эффективны, возможно ли его совершенствование с энергетической точки зрения.

Анализ тенденций в изменении удельных затрат энергии на производство алюминия методом Холла-Эру

Понятия и законы термодинамики позволяют получать ответы на данные вопросы. Например, согласно второму закону термодинамики, чтобы преобразовать теплоту Q_1 с температурой T_1 в работу, необходимо в составе тепловой машины помимо этого источника иметь теплоприемник, куда бы сбрасывалась теплота Q_2 с температурой $T_2 < T_1$, неспособная совершать работу. Иначе говоря, в работу может быть преобразована лишь часть подведенной к тепловой машине теплоты Q_1 , равная $A = Q_1 - Q_2$. С. Карно предложил определять эффективность этой машины коэффициентом полезного действия (КПД) как $\eta = A/Q_1$. Термодинамика позволяет установить условия, при которых тепловая машина будет работать с максимальным КПД, если процессы, протекающие во всех элементах машины, являются обратимыми, т.е.

$$\eta_{\max} = \frac{A_{\max}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Таким образом, впервые было показано, что у каждого типа процесса есть *термодинамический предел* его эффективности, который может быть оценен относительным КПД $\eta_{\text{отн}}$, показывающим степень приближения КПД реального процесса $\eta_{\text{реал}}$ к КПД идеального аналога:

$$\eta_{\text{отн}} = \eta_{\text{реал}} / \eta_{\max}.$$

Термодинамические пределы уже играют огромную роль в исследованиях энергетических процессов, но возможности их использования далеко не исчерпаны. Нужно приложить усилия как для расширения типов анализируемых с их помощью технических систем, устройств, так и для приложения этого метода с целью расширения круга задач и их решения. Рассмотрим подробнее, как это сделать, какие задачи можно решать и какие трудности предстоит преодолеть.

Все энергопотребляющие процессы, как правило, подвергаются исследованию с



точки зрения эффективности использования в них подведенной энергии. КПД является исчерпывающим показателем эффективности процесса и его расчет производится на основе энергетического баланса процесса (установки) как отношение

$$\eta_{\text{реал}} = I_{\text{пол}} / I_{\text{затр}},$$

где $I_{\text{пол}}$ – полезная (целевая) энергия процесса; $I_{\text{затр}}$ – энергия, затраченная на его реализацию.

Но на пути реализации этих общеизвестных и общепринятых положений существует целый ряд препятствий.

Первое препятствие. Рассчитать энергетический КПД можно лишь для тех процессов и установок, в которых производится какой-либо вид энергии или их полезный эффект может быть выражен в энергетических единицах. Это означает, что для огромного числа энергопотребляющих процессов, производящих металлы, изделия из них, промышленные материалы, химические вещества, продукты, услуги, создающие комфорт и т. д., понятия «полезная энергия» в традиционном смысле не существует. Отсюда следует, что для них не может быть рассчитан КПД в общепринятом смысле.

Для преодоления этого препятствия можно для каждого такого процесса разработать его идеальный аналог, подобный циклу Карно для тепловой машины, и на основе его энергетического баланса определить минимально необходимые затраты энергии на реализацию. Тогда может быть определен КПД как степень приближения реального процесса к его идеальному аналогу [1–3].

Второе препятствие. Различные формы энергии имеют разное качество, которое определяется способностью данного вида энергии преобразовываться в работу и другие формы энергии, что является следствием второго закона термодинамики. Признание качественного различия видов энергии означает, что прямое их суммирование при составлении энергетического баланса

недопустимо, некорректно, хотя и широко распространено в практике.

Для ликвидации второго препятствия, не позволяющего суммировать энергию разного качества, была разработана новая область энергетических исследований – *эксергетический анализ*. Для того чтобы сделать сопоставимыми разные формы энергии, была введена единая мера, позволяющая количественно оценить энергию с учетом ее качественных характеристик. Таковой мерой служит эксергия, представляющая собой количество работы, которое может быть получено внешним приемником энергии при обратимом взаимодействии термодинамической системы (потока энергии) с окружающей средой до установления полного равновесия при ее параметрах [1–9].

Все формы энергии по способности преобразовываться из одной формы в другую, в том числе работу, можно разбить на три класса.

Первый из них включает неограниченно превратимые формы энергии, преобразование которых в любую другую форму допустимо по второму закону (все виды механической и электрической энергии). Вторым классом объединяет формы энергии, преобразуемые в другие в ограниченной мере (тепловая, химическая энергия). К третьему классу относятся формы энергии, преобразование которых в работу, согласно 2-му закону термодинамики, невозможно. Сюда можно отнести тепловую энергию при температуре источника теплоты, равной температуре окружающей среды (ОС); механическую энергию при давлении рабочего тела машины, равном давлению окружающей среды.

Формы энергии, относимые к первому классу, очевидно, являются более ценными по сравнению с теми, которые отнесены к другим классам. Между собой формы энергии этого класса равнозначны не только количественно, но и качественно. Они не характеризуются энтропией и в полной мере обладают свойствами аддитивности. Превратимость таких форм энергии в работу



или другие формы не зависят от параметров окружающей среды.

Формы энергии второго класса качественно различны и не в полной мере обладают свойством аддитивности, поскольку степень их «неорганизованности», характеризующая энтропией, различна. Превратимость энергии такой формы определяется не только собственными параметрами, но и параметрами окружающей среды. В пределе ценность энергии этого класса равна нулю, если ее параметры становятся равными параметрам окружающей среды.

Таким образом, с открытием второго закона термодинамики при исследовании технических систем, в которых используются формы энергии разных классов, необходимо учитывать различие в их качестве. Иначе говоря, понятия *энергия* в этих случаях недостаточно. Появилась необходимость учитывать тот факт, что не всякая энергия и не при всех условиях может быть полностью пригодна для технического использования.

В качестве меры превратимости, пригодности энергии любого вида в середине прошлого столетия было предложено использовать максимальную работу, которую может совершить техническая система при обратимом ее переходе из любого произвольного состояния в состояние термодинамического равновесия с окружающей средой. Такая мера была названа 3. Рантом *эксергией* – E , а неспособная к совершению работы энергия – *анергией* B [7]. Все формы энергии предложено им представлять как сумму эксергии и анергии, причем каждая из них может быть равна нулю. В этом случае формы энергии, относимые по превратимости к разным группам, можно представить в виде:

для первой группы – $I \equiv E$;

второй – $I = E + B$;

третьей – $I = B$.

Во всех процессах эта сумма, в соответствии с первым началом термодинамики, остается постоянной, изменяется лишь соотношение ее составляющих. В реальных процессах подведенная эксергия расходуется (уменьшается), а анергия возрастает.

Таким образом, под эксергией понимается работоспособность энергии, то есть величина работы, которая может быть получена в преобразователе данного количества энергии в результате его обратимого взаимодействия с окружающей средой.

Величину эксергии любого из используемых видов энергии можно определять по одной общей формуле [8]:

$$E = \omega_e \cdot I ,$$

где I – энергия рассматриваемого вида; ω_e – коэффициент работоспособности энергии, который является безразмерной величиной, равной количеству работы, которую в идеальном случае можно получить с помощью единицы энергии рассматриваемого класса.

Для видов энергии первой группы (электрической, механической) $\omega_e = 1$, для энергии второй группы, например, тепловой, как было показано выше, коэффициент может принимать значение от 0 до 1 в зависимости от температуры теплоты, подводимой к тепловой машине и отводимой от нее,

$$\omega_{eq} = \frac{E_q}{I_q} .$$

Затраты эксергии легче прогнозировать и анализировать, суммировать ее расходы по отдельным процессам технологической схемы, не прибегая к помощи соответствующих переводных коэффициентов. При расчете затрат тепловой эксергии не требуется указаний о температурном потенциале тепла.

Чтобы преодолеть оба препятствия при расчете КПД любого процесса или технологии, было предложено заменить в числителе полезную энергию/работу величиной теоретических затрат энергии/работы на осуществление процесса – $I_{\min}^*$, $E_{\min}^*$. Они определяются из полного энергетического баланса идеального аналога с предельной степенью идеализации с $\eta_{\text{эн}}^{u0}=1$; $\eta_{\text{экс}}^{u0}=1$ и являются *абсолютным минимумом затрат* энергии и работы для производства



рассматриваемого продукта или услуги с помощью любой технологии. То есть тоже являются термодинамическими пределами. В такой постановке энергетическая эффективность любого технологического процесса определяется двумя КПД – энергетическим и эксергетическим:

$$\eta_{эн}^{реал} = I_{мин}^* / I_{эн}^{реал}; \eta_{экс}^{реал} = E_{мин}^* / E_{эн}^{реал}. \quad (1)$$

В связи с тем, что при такой высокой степени идеализации для многих процессов энергозатраты равны нулю, идеальный аналог может быть использован для анализа не всех реальных процессов. Поэтому более конструктивным является предложение сравнивать показатели такого реального процесса с его *идеализированным аналогом*, используя меньшую степень идеализации. При разработке такого аналога можно отразить физико-химические основы технологии, вид сырья, из которого производится продукт, и другие принципиальные особенности.

На основе энергетического баланса идеализированного аналога определяются минимально необходимые затраты энергии/работы для каждого исследуемого процесса – $I_{мин}$, $E_{мин}$. Для идеализированного аналога могут быть рассчитаны энергетический $\eta_{эн}^{идл}$ и эксергетический $\eta_{экс}^{идл}$ КПД по выражениям, подобным тем, по которым определяются эти характеристики для реальных процессов.

Сопоставление реальных процессов с идеализированными аналогами означает по существу оценку степени совершенства исследуемого процесса на основе относительных КПД:

$$\eta_{эн}^{отн} = \eta_{эн}^{реал} / \eta_{эн}^{идл}; \quad (2)$$

$$\eta_{экс}^{отн} = \eta_{экс}^{реал} / \eta_{экс}^{идл}. \quad (3)$$

Чем выше значение $\eta^{отн}$, тем совершеннее в энергетическом смысле реальный процесс и тем труднее найти пути дальнейшего его улучшения.

Полученные таким образом показатели также относятся к разряду *термодинамических пределов*. Их значение трудно переоценить для проведения различных энергетических расчетов: они дают представление об абсолютной и относительной эффективности процесса, теоретически обоснованы и безупречны, позволяют выявить достигнутый уровень совершенства и предельные его значения [1, 2, 5, 8, 9].

Поскольку полезный эффект реального процесса и его идеализированного аналога должен быть одним и тем же, то $\sum I_{пол}^{реал} = \sum I_{пол}^{идл}$ и $\sum E_{пол}^{реал} = \sum E_{пол}^{идл}$, тогда с учетом (2) и (3) можно записать

$$\eta_{эн}^{отн} = \sum I_{затр}^{идл} / \sum I_{затр}^{реал}; \quad (4)$$

$$\eta_{экс}^{отн} = \sum E_{затр}^{идл} / \sum E_{затр}^{реал} \quad (5)$$

Из последних выражений следует, что в пределе, когда $\eta_{эн}^{идл} = 1$ и $\eta_{экс}^{идл} = 1$ (идеальный аналог), значения действительных (реальных) и относительных КПД совпадают:

$$\eta_{эн}^{реал} = \eta_{эн}^{отн} \text{ и } \eta_{экс}^{реал} = \eta_{экс}^{отн}. \quad (6)$$

При реализации этой на первый взгляд простой методики возникает проблема, как определить теоретически необходимые энергозатраты для огромного количества разнотипных по характеру и назначению технологических процессов, т. е. как подобрать идеализированный аналог для каждого исследуемого процесса и учесть его специфические особенности. Нами предложена следующая группировка процессов по их целевому назначению [1, 2, 5]:

1. *Процессы производства энергии* разного вида.
2. *Физико-химические процессы производства материалов, химических соединений и прочих веществ.*
3. *Процессы производства различных изделий, совершение работы.*
4. *Процессы, цель которых обеспечить нормальные условия для жизни и ра-*



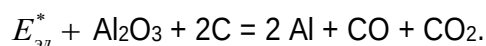
боты людей (отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха, освещение зданий различного назначения, охлаждение и замораживание продуктов).

5. *Перемещение людей и грузов в пространстве* включает все многообразие видов транспортировки всеми транспортными средствами: железнодорожным, водным, воздушным, автомобильным и т. д.

Результаты: использование единого подхода и единых критериев для оценки эффективности использования энергии во всех сферах энергетики (производство, передача и потребление энергии) и в энергопотребляющих процессах самых различных типов чрезвычайно важно и имеет единую фундаментальную основу. Полученные показатели могут быть использованы для анализа процессов с различными целями: для определения безвозвратных потерь, теоретического потенциала и реальных резервов энергосбережения, а также для оценки суммарного негативного воздействия технологий на окружающую среду. Покажем использование разработанных методов на нескольких примерах.

Пример 1. Оценка термодинамической эффективности технологии на уровне ее идеализированного аналога.

Выполним анализ процесса получения алюминия методом Холла-Эру, который является стандартным во всех странах мира. С момента разработки он подвергался постоянному конструктивному и технологическому совершенствованию. Получение алюминия осуществляется на основе электролитического разложения глинозема в расплаве криолита. Схематически процесс электролиза сводится к выделению на катоде металлического алюминия и сгоранию угольного анода за счет выделения на нем кислородсодержащих комплексов. Идеализированный аналог процесса электролиза описывается той же реакцией, что и реальный процесс [5, 10]:



На рис. 1 показаны изменения удельных расходов всех видов энергоносителей

на процесс (а) и энергетического КПД (b) за период промышленного освоения процесса. Согласно полному энергетическому балансу, на производство алюминия затрачивается электроэнергия E , химическая энергия топлива I_x в виде углерода (анодная масса или обожженные аноды), химическая энергия сырья I_c (глинозема).

За период промышленного использования этой технологии удельный расход электроэнергии на электролиз криолит-глиноземного расплава снизился более чем в 3 раза. Фактические суммарные затраты энергии постепенно приближаются к величине минимально необходимых затрат. На рисунке явно видно, что возможности снижения энергозатрат для этой технологии практически исчерпаны. Реальные энергетические затраты приближаются к затратам идеализированного аналога, который, как следует из его определения, практически недостижим. Это явный признак, что рассматриваемая технология «исчерпала себя», и либо нет возможностей повышения ее эффективности, либо эти мероприятия требуют больших экономических затрат. Поэтому можно сделать вывод, что в производстве алюминия следует переходить на новую технологию.

Кроме того, в последнее время резко возросли дефицитность и стоимость углеродистых материалов, используемых для производства анодной массы и обожженных анодов (нефтяного и пекового кокса, пека и т. п.), а также требования, предъявляемые к их качеству.

Поэтому все больший интерес специалисты проявляют к новым методам получения Al, например, к процессу электролиза с нерасходуемыми (инертными) анодами [5, 10]. Предлагаемый нами метод позволяет проанализировать новый процесс уже на уровне идеализированного аналога и сделать выводы о его возможной эффективности, структуре расходуемых энергоносителей, а, следовательно, его перспективности. Такой подход также относится к использованию термодинамических пределов, прост и удобен, а главное – теоретически обоснован.

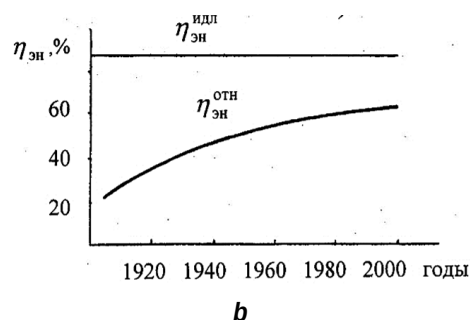
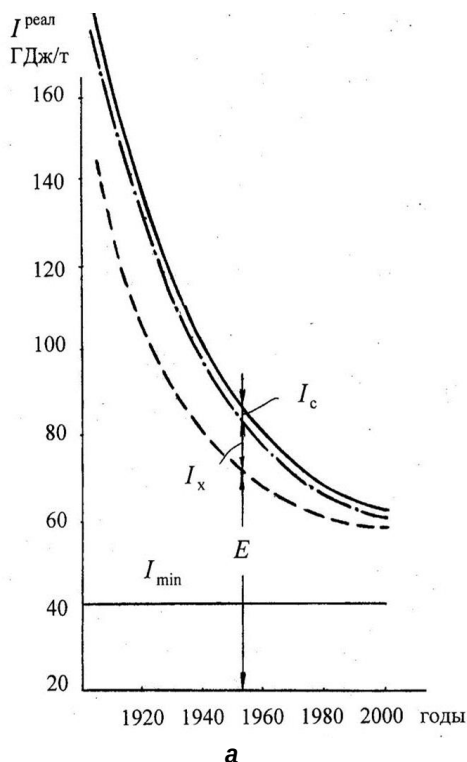


Рис. 1. Изменение удельных расходов энергии на 1 т алюминия (а) и относительных энергетических КПД (б) для метода Холла-Эру в течение XX в.

Fig. 1. Variation of specific energy consumption per 1 ton of aluminum (a) and relative energy efficiencies (b) for the Hall – Heroult method for the period of XX century

Идеализированный аналог процесса производства алюминия в электролизерах с инертными анодами можно представить реакцией:



Для этих двух технологий производства алюминия были рассчитаны материальный и полный энергетические балансы идеализированных аналогов (табл. 1). На их основе определены теоретические термодинамические характеристики – энергетический и эксергетический КПД и минимально необходимые энергетические затраты на их реализацию.

Ниже приводится сравнение предельных термодинамических характеристик этих двух процессов. КПД идеализированного аналога процесса Холла – Эру составил: $\eta_{эн}^{идл} = 0,871$, $\eta_{экс}^{идл} = 0,814$:

$$\eta_{эн}^{идл} = \frac{35,360}{40,601} = 0,871; \quad \eta_{экс}^{идл} = \frac{30,935}{38,001} = 0,814.$$

Минимально необходимые затраты на производство 1 т Al составляют 40,601 ГДж, из которых электрическая энергия составляет 53,6%, химическая энергия топлива 35,8%, химическая энергия сырья 10,6%, т. е. структура энергетических затрат может быть описана следующими соотношениями: по энергии $E_{эл} : I_m : I_c : I_q = 0,536 : 0,358 : 0,106 : 0,0$; по эксергии $E_{эл} : E_m : E_c : E_q = 0,573 : 0,383 : 0,044 : 0,0$.

Для процесса с инертными анодами эти показатели составили:

$$\eta_{эн}^{идл} = 1, \quad \eta_{экс}^{идл} = 0,945,$$

минимально необходимый расход электроэнергии в 1,43 раза выше, чем с окисляемыми:

$$\eta_{эн}^{идл} = \frac{35,360}{35,360} = 1,0; \quad \eta_{экс}^{идл} = \frac{30,935}{32,731} = 0,945.$$

Однако суммарный расход энергии у него меньше, а КПД выше, чем у процесса с



Таблица 1

Материальный и полный энергетический балансы идеализированных аналогов процесса электролиз криолит-глиноземного расплава, на 1т Al

Table 1

Material and overall energy balances of idealized analogs of electrolysis process of cryolite-alumina melt per 1t of Al

Статья баланса	Масса т	Энергия ГДж/т	Эксергия ГДж/т	Статья баланса	Масса т	Энергия ГДж/т	Эксергия ГДж/т
1	2	3	4	5	6	7	8
Электролиз с расходуемыми анодами							
П р и х о д				Р а с х о д			
Al ₂ O ₃	1,889	4,292	1,663	Al	1,0	35,360	30,935
C	0,444	14,533	14,562	CO	0,518	5,241	4,755
E _{эл}	–	21,776	21,776	CO ₂	0,815	0,0	0,0
				Потери эксергии	–	–	2,311
Итого	2,333	40,601	38,001		2,333	40,601	38,001
Электролиз с инертными анодами							
П р и х о д				Р а с х о д			
Al ₂ O ₃	1,889	4,292	1,663	Al	1,0	35,360	30,935

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
E _{эл}	–	31,068	31,068	O ₂	0,889	0,0	0,0
				Потери эксергии	–	–	1,796
Итого	1,889	35,360	32,731	Итого	1,889	35,360	32,731

расходуемыми анодами. Причем при практической реализации этого процесса у него есть целый ряд неоспоримых преимуществ. И если он подвергнется технологическому и конструктивному совершенствованию, то это может привести к снижению энергозатрат, подобно тому, как это было при внедрении существующей технологии.

Для реализации этой задачи требуется прогнозирование технического прогресса во всех отраслях экономики [11–14]. Исследования показывают, что при оценке перспективного энергопотребления следует учитывать следующие две противоположные тенденции.

Пример 2. Прогнозирование энергопотребления на долгосрочную перспективу. Одна из них связана с ухудшением качества перерабатываемого сырья, использованием менее качественных энергетических ресурсов, ужесточением требований по защите окружающей среды, что

приводит к увеличению затрат как непосредственно в производстве рассматриваемого продукта, так и в отраслях энергетического комплекса. Речь идет о переходе на обогащение более бедных руд в две стадии, о необходимости обогащения, удаления серы и других процессов предварительной переработки углей, сланцев, нефти, о новых установках для очистки технологических выбросов в окружающую среду. Все это в конечном итоге ведет к возрастанию удельных расходов энергии на производимый продукт.

Этому противостоит другая тенденция, обусловленная реализацией различных мероприятий по дальнейшему совершенствованию существующих и вводу новых, с лучшими технико-экономическими показателями, технологических процессов и оборудования. Эта тенденция направлена на снижение удельных расходов энергетических ресурсов в потребляющей сфере и



повышение энергетического КПД всех отраслей экономики.

В настоящее время широко распространено прогнозирование потребности по каждому виду энергии в отдельности – по электрической, тепловой энергии и топливу непосредственного использования. Это вносит дополнительные ошибки и неопределенность при прогнозировании, и чем больше глубина прогнозирования, тем эти ошибки значительнее. Для осуществления какого-либо процесса требуется подвести к нему определенное суммарное количество энергии при обеспечении необходимой ее структуры. То есть необходимо прогнозировать суммарное энергопотребление и затем в рамках этой величины определять долю энергии каждого вида.

Помимо этого, при создании аппарата для исследований энергопотребления нужно учитывать один из самых важных факторов – горизонт прогнозирования. Предлагаемый нами метод может быть использован для прогнозирования энергопотребления на долгосрочную перспективу. Аппарат для проведения такого рода исследований, очевидно, должен строиться упрощенно с учетом того обстоятельства, что в этом случае на момент осуществления прогноза, как правило, неизвестны либо мало достоверны технические и экономические характеристики тех процессов и оборудования, которые будут работать спустя 20 лет. В связи с этим при долгосрочном прогнозировании энергопотребления целесообразно использовать метод термодинамических пределов. Он хорошо сочетается, на наш взгляд, с нормативным методом путем замены прогноза удельных расходов энергии прогнозом энергетических КПД для основных технологий в сфере использования энергии [11–13].

Таким образом, чтобы использовать информацию об изменении термодинамической эффективности технологий для прогнозирования энергопотребления, нужно по ретроспективным данным экстраполировать значения КПД на необходимую глубину прогнозирования. Причем можно использовать данные прогноза как абсолютных, так и от-

носительных КПД. Вторым показателем предпочтительней, поскольку, как было отмечено выше, идеальные аналоги не всегда пригодны для этой цели по причине предельных энергетических затрат для них (часто равны нулю).

Для каждой технологии из рассматриваемого списка должен быть разработан идеализированный аналог, определены минимально необходимые затраты энергии и работы $I_{\min}$, $E_{\min}$ и величины его энергетического и эксергетического КПД $\eta_{\text{эн}}^{\text{идл}}$, $\eta_{\text{экс}}^{\text{идл}}$. Расчетным путем устанавливаются тенденции роста фактических КПД рассматриваемых технологий и делается прогноз на будущее ($\eta_{\text{эн}_t}$, $\eta_{\text{экс}_t}$ – на прогнозируемом уровне). На основе этих показателей определяется относительный энергетический КПД технологии:

$$\eta_{\text{эн}_t}^{\text{отн}} = \eta_{\text{эн}_t} / \eta_{\text{эн}}^{\text{идл}} \quad (8)$$

$$\eta_{\text{экс}_t}^{\text{отн}} = \eta_{\text{экс}_t} / \eta_{\text{экс}}^{\text{идл}} \quad (9)$$

и удельные энергозатраты для прогноза

$$I_t = I_{\min} / \eta_{\text{эн}_t}^{\text{отн}} ; E_t = E_{\min} / \eta_{\text{экс}_t}^{\text{отн}} .$$

Те виды производства, для которых могут быть определены предельные энергетические затраты на основе идеального аналога, удельные затраты для прогноза могут быть определены и через абсолютный КПД, т. е.

$$I_t = I_{\min}^* / \eta_{\text{эн}_t} ; \quad (10)$$

$$E_t = E_{\min}^* / \eta_{\text{экс}_t} . \quad (11)$$

На основе исследования энергетического баланса реального процесса и баланса его идеализированного аналога можно определить и структуру энергоносителей для него: долю электрической энергии ($E_{\text{эл}}$), химической энергии топлива ($I_{\text{м}}$), химической энергии сырья ($I_{\text{с}}$), тепловой



энергии (I_q), т.е. структура энергетических затрат может быть описана следующим соотношением: $E_{эл} : I_m : I_c : I_q$. Соответственно для эксергетических затрат: $E_{эл} : E_m : E_c : E_q$.

Многочисленные исследования показывают, что учет основных энергоемких отраслей промышленности, транспорта, коммунально-бытового сектора и сельского хозяйства позволяют описать не менее 70% энергопотребления любого региона. Все остальные энергозатраты могут быть учтены посредством коэффициента γ . Таким образом, с учетом разработанной методики потребность в энергии/эксергии на горизонт прогнозирования t может быть определена следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{I}_t = & (1 + \gamma_t) \times \\ & \times \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{\alpha}_{ij} \cdot \bar{M}_{ij} \cdot \bar{I}_{min_{ij}} / \text{ext} \{ \eta_{эл_{ij}}^{омн} \} + \right. \\ & \left. + \bar{P}_t \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{I}_{min_{ij}} / \text{ext} \{ \eta_{эл_{ij}}^{омн} \} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь i – индекс продукции, услуги, полезного эффекта; j – индекс технологии производства i -й продукции; t – горизонт прогнозирования; M – объем производства продукции; α_{ij} – доля i -й продукции, производимой по j -й технологии; P – численность населения. Величины с черточками наверху являются прогнозными.

Первая составляющая учитывает затраты на производство продукции, задаваемой суммарными объемами. Вторая – энергопотребление, рассчитываемое на душу населения. Это относится к системам жизнеобеспечения (отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха, горячее водоснабжение, пищеприготовление, освещение и т. п.); системам всех видов транспорта людей; различного рода услуг.

В связи с неопределенностью исходной информации, величины $\bar{I}_t$ и $\bar{E}_t$ получают в некотором диапазоне, который возрастает с увеличением глубины прогнозирования.

Заключительным этапом прогнозирования является распределение суммарной потребности в энергии между различными видами энергии: химической энергией сырья, топлива, электрической и тепловой энергией в соответствии со структурой используемых энергоносителей в основных энергоемких технологиях.

В качестве примера рассмотрим 2-ю группу процессов по нашей классификации. Идеальным аналогом производства какого-либо вещества с заданным химическим составом является обратимая химическая реакция с $\eta_{эл} = 1$; $\eta_{эк} = 1$. Таким свойством обладает реакция девальвации данного вещества, используемая при определении его химической энергии (i_x) и эксергии (e_x). Следовательно, предельные минимальные затраты энергии I_{min}^* и E_{min}^* для производства заданного k -го вещества определяются величиной его химической энергии/эксергии. Эти затраты абсолютно минимальны для производства данного вещества вне зависимости от используемого сырья, извлекаемого из окружающей среды, и применяемой технологии его переработки. Таким образом, можно записать

$$I_{min_k}^* = i_{x_k}, \quad E_{min_k}^* = e_{x_k}, \quad (13)$$

т. е. в качестве предельных энергетических затрат для процессов 2-й категории могут быть приняты соответствующие значения их химической энергии и эксергии [1, 5]. В табл. 2 приведены эти показатели для некоторых металлов, неорганических и органических химикатов.

Для уменьшения объема исходной информации при прогнозировании энергопотребления нами рассматривались не отдельные процессы, а технологические цепочки, начиная от добычи и переработки сырья до получения готового продукта. В табл. 3 приведены термодинамические пределы для некоторых технологий производства основных металлов [1, 4, 5].



Таблица 2

Значения предельных (теоретических) затрат энергии на получение некоторых металлов, неорганических и органических веществ, ГДж/т

Table 2

Values of marginal (theoretical) energy costs for production of some metals, inorganic and organic substances, GJ/t

Продукт	Химическая формула	i_x , ГДж/т	Продукт	Химическая формула	i_x , ГДж/т
1	2	3	4	5	6
Металлы			Сода кальцинированная	Na_2CO_3	1,022
Чугун	$\text{Fe} + \sim 4\%\text{C}$	9,51	Сода каустическая	NaOH	3,449
Сталь углеродистая	$\text{Fe} + \text{до } 1,7\%\text{C}$	8,954	Серная кислота	H_2SO_4	0,971
Алюминий	Al	35,36	Сера	S	19,464
Свинец	Pb	1,544	Хлор	Cl_2	0,705
Хром	Cr	12,656	Карбид кальция	CaC_2	24,68
Медь	Cu	3,541	Органические химические соединения		
Марганец	Mn	9,501	Этанол	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	29,744
Никель	Ni	6,217	Бензол	C_6H_6	41,904
Серебро	Ag	0,788	Мочевина	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	10,542
Цинк	Zn	7,006	Метанол	CH_3OH	22,720
Олово	Sn	5,004	Этилен	C_2H_4	50,404
Титан	Ti	19,729	Уксусная кислота	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	14,588
Неорганические химические соединения			Ацетилен	C_2H_2	49,996
Аммиак	NH_3	20,509	Изопрен	C_5H_8	46,486
Водород	H_2	143,0			

Таблица 3

Энергетические показатели идеализированных аналогов производства некоторых металлов и кремния

Table 3

Energy performances of idealized analogs of some metal and silicon production

Продукт, технология	Минимально необходимые затраты, ГДж/т		$\eta_{\text{идл}}^{\text{эн}}$, %	$\eta_{\text{идл}}^{\text{экс}}$, %
	энергии	эксергии		
Сталь выплавленная по технологии:				
– выплавка чугуна-выплавка стали	14,423	12,177	59,2	54,3
– электроплавка металлолома	2,692	2,142	88,1	86,0
– прямое восстановление железа	3,077	2,482	77,1	74,1
Алюминий (из глинозема)	40,601	37,904	87,1	81,6
Медь (пирометаллургические способы)	28,01	21,66	12,6	12,7
Свинец (шахтная плавка)	6,002	5,455	25,7	27,0
Цинк				
– пирометаллургические способы	23,063	20,553	30,3	28,9
– гидрометаллургический способ	20,288	17,760	34,6	33,4
Титан (магнийтермический способ)	37,216	37,042	53,2	50,3
Кремний (электроплавка)	52,571	52,622	61,6	58,2



Как следует из изложенного, прогнозирование энергопотребления прямо зависит от прогноза научно-технического прогресса в рассматриваемой отрасли. В процессе разработки научно-технических прогнозов определяется возможность создания принципиально новой техники, изучаются и планируются изменения технического уровня производства и качества продукции, устанавливаются необходимые затраты и технико-экономические показатели для новой техники. Неотъемлемой частью прогноза научно-технического прогресса явля-

ется также определение оптимальной структуры технологий в различных отраслях.

Объем работы, которую нужно провести для подготовки энергетических характеристик технологий, чрезвычайно велик. Тем не менее, без качественного прогноза энергопотребления бессмысленно детально прогнозировать развитие энергетики и выбирать структуру энергетических технологий. Поэтому исследования в области энергетики отраслей экономики должны быть важным разделом при прогнозировании энергопотребления на перспективу.

Заключение

Термодинамика изучает законы преобразования энергии из одного вида в любой другой. Поскольку всевозможные потери происходят именно в момент этих преобразований, их надо изучать, это влияет на эффективность процесса. Поэтому область применения термодинамики очень широка, постоянно расширяется с течением времени и позволяет получить новые результаты. В настоящей статье рассмотрены возможности использования термодинамических пределов, в числе которых помимо КПД тепловой машины Карно, уже вошли многие другие, ранее не используемые показатели. Это минимально необходимые затраты энергии на производство химических веществ, продуктов и эффектов в различных

отраслях экономики, идеальные и идеализированные аналоги процессов и их КПД. Привлечение второго начала термодинамики с использованием понятия эксергия в эти исследования еще более повышает уровень достоверности и значимости полученных результатов.

Пользуясь величинами термодинамических пределов, можно определить теоретический потенциал энергосбережения каждой технологии, нужный момент замены одной технологии, исчерпавшей себя, другой, более совершенной. И даже по суммарным выбросам эксергии оценить уровень негативного влияния технологии на окружающую среду.

Библиографический список

1. Stepanov V.S. Analysis of energy efficiency of industrial processes. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 187 p.
2. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Эксергетический анализ систем генерирования, транспорта и потребления энергии. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2016. 276 с.
3. Stepanov V.S., Stepanov S.V. Energy use efficiency of metallurgical processes // Energy Conversion & Management. 1998. Vol. 39. No. 16–18. P. 1803–1809.
4. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Химическая энергия и эксергия веществ: методы расчета, область применения, справочные данные. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2017. 217 с.
5. Степанов В.С., Степанов С.В. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2013. 380 с.
6. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. New York: Hemisphere, 1988.
7. Rant Z. Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit" // Forsch. Ing. Wes. 1956. Vol. 22, No. 1. P. 36–37.
8. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 296 с.
9. Groscurth H.M., Kümmel R., Van Gool Thermodynamic limits to energy optimization // Energy. 1989. Vol. 14. No. 5. P. 241–258.
10. Багров О.Н., Клешко Б.М., Михайлов В.В. Энергетика основных производств цветной металлургии. М.: Металлургия, 1979. 376 с.
11. Бялковская В.С. Перспективное планирование направлений технического прогресса. М.: Экономика, 1973. 191 с.



12. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. М.: Прогресс, 1974. 586 с.
13. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P., Stepanova T.B. World energy and transmission to sustainable development. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers. 2002. 264 p.

14. Баймачев Е.Э. Определение минимальных затрат эксергии на отопление и естественную вентиляцию жилых зданий // Известия вузов. Строительство. 2014. № 7. С. 67–73.

References

1. Stepanov V.S. *Analysis of energy efficiency of industrial processes*. Heidelberg: Springer-Verlag Publ., 1992, 187 p.
2. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. *Eksergeticheskij analiz sistem generirovaniya, transporta i potrebleniya energii* [Exergy analysis of energy generation, transportation and consumption systems]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2016, 276 p. (In Russian)
3. Stepanov V.S., Stepanov S.V. Energy use efficiency of metallurgical processes. *Energy Conversion & Management*, 1998, vol. 39, no. 16–18, pp. 1803–1809.
4. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. *Himicheskaya energiya i eksergiya veshchestv: metody rascheta, oblast' primeneniya, spravочnye dannye* [Chemical energy and exergy of substances: calculation methods, application field, reference data]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2017, 217 p. (In Russian)
5. Stepanov V.S., Stepanov S.V. *Termodinamicheskie issledovaniya metallurgicheskikh processov: energeticheskie balansy, eksergeticheskij analiz* [Thermodynamic studies of metallurgical processes: energy balances, exergy analysis]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2013, 380 p. (In Russian)
6. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R. *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. New York: Hemisphere, 1988.
7. Rant Z. Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit". *Forsch. Ing. Wes.* 1956, vol. 22, no. 1,

pp. 36–37.
8. Brodyanskij V.M. *Eksergeticheskij metod termodinamicheskogo analiza* [Exergy method of thermodynamic analysis]. Moscow: Energiya Publ., 1973, 296 p. (In Russian)
9. Groscurth H.M., Kümmel R., Van Gool Thermodynamic limits to energy optimization. *Energy*. 1989, vol. 14, no. 5, pp. 241–258.
10. Bagrov O.N., Kleshko B.M., Mihajlov V.V. *Energetika osnovnykh proizvodstv cvetnoj metallurgii* [Power generating centres of the main production of non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1979, 376 p. (In Russian)
11. Byalkovskaya V.S. *Perspektivnoe planirovanie napravlenij tekhnicheskogo progressa* [Long-term planning of technical progress directions]. Moscow: Ekonomika Publ., 1973, 191 p. (In Russian)
12. Yanch E. *Prognozirovaniye nauchno-tekhnicheskogo progressa* [Prediction of the scientific and technological progress]. Moscow: Progress Publ., 1974, 586 p. (In Russian)
13. Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P., Stepanova T.B. World energy and transmission to sustainable development. Dordrecht. Boston. London: Kluwer Academic Publishers, 2002, 264 p.
14. Bajmachev E.E. The definition of minimal cost energy for heating and natural ventilation of residential buildings. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Construction], 2014, no. 7, pp. 67–73.

Критерии авторства

Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степанов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: stepanov@istu.edu

Степанова Татьяна Борисовна, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: stepanov@istu.edu

Старикова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: natalia-starikova@yandex.ru

Contribution

Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interest

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir S. Stepanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, e-mail: stepanov@istu.edu

Tatiana B. Stepanova, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, e-mail: stepanov@istu.edu

Natalia V. Starikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, e-mail: natalia-starikova@yandex.ru



Перспективы развития угольной энергетики Монголии

© Л.Н. Такайшвили*, А.Д. Соколов**, Батхуяг Содовын***

*.**Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

***Институт энергетики Монгольского университета науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия

Резюме: Монголия обладает значительными ресурсами высококачественного угля, добыча которого направлена на внутреннее потребление страны (нужд энергетики, экспорта угля и электроэнергии). Высокая обеспеченность запасами углей позволяет рассматривать уголь как надежный источник топлива на длительную перспективу. Среди источников энергии уголь является наиболее важным видом топлива в Монголии. Его доля в потреблении первичных энергоресурсов составляла в ретроспективе от 60 до 80%. Основными потребителями угля являются объекты энергетики. В исследованиях использованы официальные статистические данные и документы официальных монгольских и международных органов. Исследования проведены с применением методов системного анализа. В статье дан обзор состояния энергетики Монголии. Показана ведущая роль угля в обеспечении топливом электростанций. Выполнена оценка запасов угля, пригодных для использования на электростанциях Монголии. Приведены основные качественные характеристики углей месторождений: калорийность, содержание золы, серы, влаги. Представлены проекты строительства угольных электростанций. На перспективу уголь будет продолжать оставаться одним из основных топливно-энергетических ресурсов в топливно-энергетическом балансе Монголии. Дальнейшее развитие угольной энергетики Монголии зависит от возможностей увеличения объемов геологоразведочных работ, развития транспортной и производственной инфраструктур, развития внутреннего и внешнего рынков электроэнергии и минеральных ресурсов. Пространственное расположение Монголии, наличие значительных ресурсов угля для развития энергетики, необходимость и заинтересованность в наращивании внутреннего энергопотребления создают благоприятные условия для участия Монголии в межгосударственном энергетическом объединении в Северо-Восточной Азии, которое носит название «Азиатское суперкольцо». Международные компании участвуют в разработке и реализации различных проектов, связанных с углем, что значительно повышает возможности развития угольной энергетики Монголии.

Ключевые слова: Монголия, энергетика, электростанция, уголь, запасы, потребление, проекты, экспорт

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант №18-510-94006

Информация о статье: Дата поступления 02 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 18 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Формат цитирования: Такайшвили Л.Н., Соколов А.Д., Батхуяг Содовын Перспективы развития угольной энергетики Монголии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):137–147. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-137-147.

Development prospects of coal-fired power industry in Mongolia

Lyudmila N. Takaishvili, Aleksandr D. Sokolov, Batkhuyag Sodovyn

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Power Engineering School of the Mongolian University Science & Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Abstract: Significant resources of high-quality coal in Mongolia provide the conditions for the development of coal production for domestic consumption by the energy sector as well as for the export of coal and electric power. High availability of coal reserves allows to consider coal as a reliable long term source of fuel. Among the sources of energy coal is the most important fuel in Mongolia. Retrospectively its percentage in primary energy resources consumption was from 60 to 80%. The main consumers of coal are power engineering facilities. The study uses the official statistics and the documents of official Mongolian and international bodies. The study has been conducted using system analysis methods. The article overviews the state of the Mongolian energy sector. The leading role of coal in provision power plants with fuel is shown. The coal reserves suitable for the use at Mongolian power plants are estimated. The main qualitative characteristics of coal deposits are given including calorific value, content of ash, sulfur and moisture. The construction projects of coal-fired power plants are presented. In the future, coal will continue to be one of the main fuel and energy resources in the fuel and energy balance of Mongolia. Further development of the Mongolian coal-fired power industry depends on the possibilities of increasing the volumes of geological exploration, development of transport and production infrastructures, growth of the internal and domestic markets of electrical power and mineral resources. The spatial location of Mongolia, availability of significant coal resources necessary for the development of the energy sector, the relevance and interest in increasing the



domestic consumption of energy creates favorable conditions for Mongolia's participation in the Asian Super Grid - Interstate energy associations in Northeast Asia. International companies are involved in the development and implementation of various projects related to coal, which significantly increases the opportunities for the development of coal-fired power industry in Mongolia.

Keywords: Mongolia, energy sector, power plant, coal, reserves, consumption, projects, export

Acknowledgements: The research has been carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 18-510-94006

Information about the article: Received November 02, 2018; accepted for publication January 18, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Takaishvili L.N., Sokolov A.D., Batkhuyag Sodovyn. Development prospects of coal-fired power industry in Mongolia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):137–147. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-137-147.

Введение

Среди источников энергии для внутреннего потребления уголь является наиболее важным видом топлива в Монголии [1, 2]. Запасы угля значительно больше, чем запасы других энергоносителей, таких как нефть и газ. Монголия располагает значительными ресурсами угля [3, 4], которые могут обеспечить не только внутреннюю потребность в угле, но и экспорт, в том числе электроэнергии с угольных электростанций. В потреблении первичных энергоресурсов доля угля составляла в ретроспективе от 60 до 80% [5]. Далее идут нефть и нефтепродукты, на долю которых приходилось от 15 до 25% [6]. Гидроэнергия составляла в потреблении очень малую часть – менее 0,1%. При наличии значительных ресурсов угля для энергетики обеспеченность собственной электроэнергией в 2016 г. составила 80%.

У Монголии есть значительный потенциал, в том числе основанный на ресурсах угля, для развития энергетического сотрудничества с соседними странами. Уголь может быть основным ресурсом для участия Монголии в межгосударственном энергетическом объединении / Interstate electric power system – (МГЭО/ IPES) со странами Северо-восточной Азии (СВА). Из стран-участников Азиатского Суперкольца (Япония, КНР, КНДР, Республика Корея и Россия

– восточные регионы) уровень потребления электроэнергии на душу населения в Монголии ниже в 2–5 раз. Исключение составляет только КНДР, где уровень энергопотребления на душу населения ниже монгольского более чем в два раза [7]. Дефицит электроэнергии в стране за последние годы продолжает расти, несмотря на наличие значительных энергетических ресурсов разных видов (традиционных и нетрадиционных) [7, 8]. Активное сотрудничество является жизненно важным для дальнейшего экономического роста и развития страны в настоящее время.

В 2015 г. Парламент Монголии одобрил «Государственную политику в области энергетики». Одна из целей энергетической политики, кроме обеспечения энергетической безопасности, стать страной-экспортером энергии с эффективными и экологически чистыми технологиями. Это включает разработку взаимовыгодного сотрудничества с соседними странами в области энергетики и поддержку экспортно-ориентированных энергетических проектов [9]. Одна из целей развития энергетики, рассматриваемых в документе, – внедрение экспортно-ориентированных проектов электростанций на базе Шиве Обоо и других угольных месторождений.

Существующее состояние энергетического сектора Монголии и перспективы развития

Энергетический сектор Монголии условно разделен на пять отдельных энер-

госистем: Центральная, Западная, Восточная и Южная энергосистемы, и энергоси-



стема Алтай-Улиастай. Условность этого разделения заключается в том, что в некоторых из этих энергосистем имеется только один собственный источник. Энергетический сектор Монголии включает 7 электростанций, более десятка гидроэлектростанций малой мощности (от 0,5 до 2 МВт), ветропарк, автономные системы возобновляемых источников энергии, региональные дизель-генераторы и девять распределительных систем [10]. Суммарная установленная мощность составляет 1112 МВт, из них на угольные электростанции приходится 1090 МВт. Уголь является доминирующим видом топлива для выработки электро- и теплоэнергии. Доля угольной генерации составляет 89%, на солнечные и ветровые электростанции приходится 5%, на дизельные 4% и ГЭС – 2%. В выработке теплоэнергии – 91% приходится на угольные электростанции и котельные.

Самая крупная энергосистема Монголии – Центральная, с установленной мощностью 1037 МВт, из которых 987,3 МВт приходится на угольные электростанции. Она покрывает спрос на энергию 70% от общей численности населения, включая город Улан-Батор и 14 провинций. В состав Центральной энергосистемы входят 6 из 7 угольных электростанций и ею вырабатывается 95% электроэнергии. Эта энергосистема связана с российской энергетической системой. Остальные энергосистемы снабжают электроэнергией – каждая от 2 до 3-х провинций Монголии. Западная энергосистема связана с российской энергосистемой, а Центральная – с российской и китайской.

Дизельные электростанции мощностью от 10 кВт до 3 МВт страны не имеют электрических связей с энергосистемами Монголии. Они обеспечивают электроэнергией отдаленные районы. Кочевниками-скотоводами чаще используются установки на основе солнечных батарей и гораздо реже – автономные дизельные мини-электростанции.

Наличная мощность электростанций составляет всего 69% от текущей установленной мощности из-за большой изношен-

ности оборудования и низких показателей пиковой мощности. Для покрытия пиков спроса и поставки электроэнергии в изолированные приграничные районы страны Монголия импортирует электроэнергию из России – 15% от объемов импорта электроэнергии, и Китая – 85%. За период 2010–2015 гг. импорт электроэнергии из соседних стран быстро увеличился и составил более 20% от потребления электроэнергии Монголией. Это произошло во многом благодаря быстрому росту спроса на электроэнергию в регионе Южной Гоби, для снабжения горнодобывающих предприятий. Недостающая балансовая нагрузка Западной и Центральной энергосистем компенсируется импортом электроэнергии из России. В 2015 г. импорт электроэнергии из России Западной энергосистемой из Красноярской энергосистемы составил 107 ГВт час или 75% от потребности энергосистемы. Центральной энергосистемой из Бурятии импортировано 176 ГВт час (при экспорте в Россию 56 ГВт час), а из Китая – 1200 ГВт·ч [9]. Дефицит электроэнергии в стране за последние годы продолжает расти, несмотря на наличие значительных энергетических ресурсов разных видов (традиционных и нетрадиционных) [7, 8].

Особенностью энергосистемы Монголии является то, что она неразрывно связана с функционированием системы отопления. Климат экстремально резкоконтинентальный: 8 месяцев отопительного сезона – зимние температуры обычно в диапазоне ниже минус 20°C – минус 40°C, иногда могут опуститься до -50°C. Стабильное теплоснабжение – это вопрос выживания человека. Основная доля потребности в отоплении покрывается комбинированными угольными теплоэлектростанциями (ТЭЦ), которые обеспечивают электроэнергией, теплом и горячей водой Улан-Батор и другие крупные города. Системы центрального отопления в Улан-Баторе, Дархане, Эрдэнете и Чойбалсане являются неотъемлемой частью энергетического сектора и обеспечивают почти 40% городского спроса теплом. Улаан Баатар имеет три ТЭЦ: ТЭЦ-2, ТЭЦ-3 и ТЭЦ 4. Наиболее крупные из них ТЭЦ 4 с



установленной мощностью 580 МВт, а тепловой – 1373 Гкал/ч и ТЭЦ 3 -148 МВт, а тепловой – 655 Гкал/ч. Эти ТЭЦ используют бурый уголь с Баганурского угольного разреза. Установленные мощности остальных ТЭЦ Монголии ниже 50 МВт, а тепловой около 300 Гкал/ч. они используют уголь с ближайших угольных разрезов. Небольшие города также имеют системы централизованного теплоснабжения, но снабжаются в основном угольными котельными. В выработке тепловой энергии 78% приходится на угольные электростанции, 13% на котельные и 9% на бойлерные установки [9]. В последние годы спрос на тепло растет высокими темпами.

Из стран-участников Азиатского Суперкольца (Япония, КНР, КНДР, Республика Корея и Россия – восточные регионы) уровень потребления электроэнергии на душу населения в Монголии ниже в 2–5 раз. Исключение составляет только КНДР, где уровень энергопотребления на душу населения ниже монгольского более чем в два раза [7]. Одна из задач развития энергетики Монголии – повышение энергопотребления на душу населения с целью улучшения качества жизни.

Основные проблемы энергосистемы Монголии: дисбаланс между спросом и предложением электро- и теплотенергии; старение генерирующих и передающих объектов; высокие уровни потерь при передаче энергии; недостаточные инвестиции в развитие энергетической инфраструктуры. Дефицит пиковой мощности во время зимних максимумов нагрузки является одной из проблем в электроэнергетике Монголии, как на современном этапе, так и в перспективе [11]. Большая часть ТЭЦ эксплуатируется не на полную мощность вследствие того, что качество угля намного ниже, чем предусмотрено проектом для используемых типов котлоагрегатов. Ситуация усугубляется проблемами с поставками топлива и запасных

частей для оборудования. Серьезной проблемой является и возраст системы (годы ввода в эксплуатацию Улаан-Баторских ТЭЦ 2; 3 и 4, соответственно, 1961–1969; 1968–1982 и 1983) [12]. Остаточный срок службы электростанций составляет в среднем 10–12 лет. Очевидно, что в ближайшем будущем станции потребуют серьезной модернизации, а в среднесрочной перспективе Монголии будет нужна полная замена генерирующих мощностей. Для развития энергосистемы Монголии уголь в настоящее время является наиболее дешевым и доступным энергоресурсом.

Прогнозируется значительный рост спроса на электроэнергию в Монголии, особенно в регионе Южного Гоби, что обусловлено планами широкомасштабного развития горнодобывающей промышленности, в основном, для экспорта минеральных ресурсов, электроэнергии и необходимостью повышения энерго- и теплообеспечения всех секторов развития экономики страны и населения. Согласно прогнозу министерства энергетики Монголии, потребность в электрической мощности (по сравнению с 2016 г.) может к 2030 г. возрасти в 4–5 раз, в зависимости от сценария развития экономики, и составить от 4000 до 5000 МВт [10]. Более ранние оценки потребности в электрической мощности к 2020 г., представленные Секретариатом Энергетической Хартии составляли от 1500 до 2000 МВт [12]. Потребность в электроэнергии, согласно сценариям, представленным в Стратегии развития систем зеленой энергетики в Монголии [13], может возрасти с 5,2 млрд кВт ч в 2016 г. до немногим более 20 млрд кВт ч. в 2035 г.

В Стратегии развития систем зеленой энергетики в Монголии рассматривается три сценария развития энергетики Монголии, при этом доля угольной энергетики может составить от 60% до 95%, что соответствует от 12 до 20 млрд кВт·ч.

Запасы угля для развития энергетики

По ресурсам угля Монголия входит в первую десятку в мире и является лидером

по запасам угля на душу населения. Около 320 месторождений и проявлений угля со-



средоточено в пределах 15 бассейнов. Наиболее крупные из которых: Южный-Гоби, Чойр-Нялга, Чойр-Нялга, Орхон-Селенге и Сухе Батор. Ресурсы угля оцениваются в 173,5 млрд т, в том числе около 31,7 млрд т разведанных запасов категорий А+В+С1 (состояние на 1.01.2016 г) [14]. Малую изученность месторождений показывает отношение запасов к ресурсам, которое для разных угольных бассейнов в среднем составляет 18%. Месторождения угля размещены по территории Монголии почти равномерно. Это благоприятно влияет на создание основательной топливной базы энергетики. Наиболее изученные месторождения каменноугольного бассейна Южный-Гоби с углями экспортного качества и бурого угольного бассейна Чойр-Нялга. В настоящее время разрабатываются в основном месторождения, запасы которых ранее были тщательно изучены. Поэтому стоит за-

дача увеличения геологопоисковых и геологоразведочных работ для обеспечения интенсивно развивающейся монгольской энергетики надежной топливной базой. Для целей энергетики используются в основном месторождения бурых углей. Месторождения каменных, в особенности коксующихся углей разрабатываются для развития экспорта угля. На этих месторождениях уже существуют или строятся обогатительные фабрики. Низкосортные продукты переработки углей используются на электростанциях. Уголь месторождений, где планируются, строятся или действуют электростанции, отличается большими объемами запасов и, в основном, высоким и средним качеством (табл. 1).

Проекты разработки месторождений угля предусматривают также строительство угольных электростанций на борту предприятий для обеспечения собственных нужд [17] и других потребителей.

Производство и использование угля

Разработка угольных месторождений в стране началась с 1922. До 1965 г. добывалось малое количество угля. Ведется разработка более 30 угольных месторождений. Крупномасштабная добыча осуществляется только в Центральном и Южном регионах. По количеству ежегодной добычи угледобывающие предприятия в Монголии могут быть разделены на две группы: местные небольшие и крупные предприятия. Местные предприятия характеризуются малыми объемами добычи, сезонной эксплуатацией (только в зимний период). Эта группа предприятий обеспечивает потребление угля в качестве топлива для котельных и бытового использования в малых населенных пунктах. Крупные предприятия функционируют полный сезон. Они характеризуются большими объемами ежегодной добычи и поставляют уголь на электростанции центральной энергетической системы, другим потребителям и на экспорт.

Уголь использовался только для

внутреннего потребления до 2000 г. Основным потребителем угля являлись электростанции (табл. 2). Потребление угля электростанциями составляло в разные годы от 78% до 86% в объемах внутреннего потребления. Внутреннее потребление угля с 1990 г. возросло на 30%, при этом потребление угля электростанциями увеличилось на 55% при относительно стабильных объемах потребления прочими потребителями (промышленность и строительство, транспорт и связь, сельское хозяйство, коммунальное жилье и др.).

Для внутреннего потребления используется, главным образом, бурый уголь. Все объемы добычи каменного угля, в основном, идут на экспорт. Внутренняя потребность в угле обеспечивается полностью собственной добычей. На долю электростанций приходится около 80% от объемов потребления, коммунального быта – около 10%, промышленности – 5%, прочих потребителей – 5%.



Таблица 1

Месторождения угля для строительства электростанций

Table 1

Coal deposits for power plant construction

Месторождение	Вид угля	Запасы, млн т	Качественные характеристики			
			A ^d , %	W, %	S, %	Q, cal/Kg
Тавантолгой	Коксующийся	6500	20	32,5	0,5	8000
Нариин Сукхант	Каменный	125,5	5,0–30,2	28,3–40,4	0,16–0,8	6680
Шивее-Обо	Бурий	600	40	43	0,53	3000
Тевшин-Гоби	Бурий	960	22	45	1	3000
Багануур	Бурий	599,8	12,9	43,3	0,5	3500
Улаан-Обоо	Каменный	129,9	10,0–23,7	39,9–52,3	0,13–0,5	7250
Талбулаг	Бурий	421,3	20	47	0,8	2500

Примечания: A^d – зольность; W – общая влага; S – сера; Q – теплота сгорания [5, 16] / Note: A^d – ash content; W – total moisture; S – sulfur; Q – calorific value [5, 16]

Таблица 2

Производство и использование угля, млн т

Table 2

Production and use of coal, mln tons

Показатель	Год								
	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Добыча, всего	5,2	7,5	25,2	32,0	29,9	30,1	25,3	24,2	35,5
Переработка угля	–	–	–	2,6	3,8	10,1	4,6	2,6	3,0
Поставки угля	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Экспорт	0,0	2,1	16,7	16,6	15,5	12,6	14,3	13,3	24,1
Внутреннее потребление	5,2	5,5	6,9	6,8	7,4	8,2	8,3	7,8	8,6
в т.ч. электростанции	4,4	4,6	5,5	5,4	5,8	6,4	6,7	6,7	6,7

Примечание: источники [2, 16] / Sources [2, 16].

Проекты развития угольной энергетики Монголии

Для улучшения общей энергетической безопасности, сокращение дефицита электроэнергии, подключения к электро- и теплоснабжению районов, не имеющих пока такого подключения, и экспорта электроэнергии планируется строительство новых электростанций и расширение мощности существующих [18].

В сентябре 2016 г. правительством Монголии утвержден план развития сектора энергетики на 2016–2020 гг. [9], который включает:

- расширение возможностей существующих теплоэлектростанций;
- строительство новых электростанций;
- внедрение экспортных проектов, базирующихся на месторождении угля

Шива Обоо и других угольных месторождениях;

- увеличение доли возобновляемых источников электроэнергии;
- другие мероприятия, направленные на повышение эффективности производства электроэнергии и внедрение передовых технологий, а также внедрение пионерских проектов по использованию метана из угольных пластов.

Планируется развитие энергетики на основе угольной генерации и возобновляемых ресурсов, с преобладанием угольной генерации [7]. Мероприятия по развитию энергетики Монголии направлены на создание объединенной электроэнергетической системы и, в дальнейшем, ее интеграцию в энергетический рынок, образуемый в рам-



ках международной энергетической кооперации стран СВА при присоединении к супер-азиатскому энергетическому кольцу. Проекты развития энергетики предусматривают строительство угольных электростанций для удовлетворения внутренней потребности, в том числе в электроэнергии при разработке месторождений, и ориентированы на экспорт. Программой социально-экономического развития Монголии Министерством энергетики планируется строительство и расширение 11 электростанций. Наиболее крупные электростанции представлены в табл. 3.

Строительство угольных электростанций, запланированных до 2023 г.: ТЭЦ Таван Толгой; Багануурская ТЭЦ, комбинированная теплоэлектростанция № 5 (CHP5) в Улан-Баторе, ТЭЦ в западной Монголии, ТЭЦ для экспорта электроэнергии (Shivee Ovoo) и ТЭЦ в восточном регионе Дорнод. (табл. 3). В городах Дорнод, Дархан, Эрдэнэт планируется реконструкция электростанций малой мощности (36–48 МВт) до 50 МВт. В Улан-Баторе расширение мощности, существующей ТЭЦ 4 (570 МВт) планируется за счет подключения энергоблоков суммарной мощностью 540 МВт (3 x 80 МВт, 3 x 110 МВт).

Наиболее (стратегически) важными и критическими для обеспечения прогнозируемого энергопотребления проектами считаются электростанция «Таван Толгой» на одноименном месторождении угля «Shivee Energy», энергетически комплексных и ТЭЦ 5.

На электростанциях планируется использование современных технологий и оборудования с целью уменьшения вредных для окружающей среды газов, таких как внутрицикловая газификация, парогазовые установки, установки для улавливания, хранения и утилизации CO₂ и CO и т.п. [13].

«Shivee Energy» энергетически и комплексно ориентирован на объединение энергосистем СВА. Это сложный проект, объединяющий следующие предприятия: угледобывающее, мощностью 20 млн. т/год; угольная электростанция с установленной мощностью от 5,280 МВт, в дальнейшем до 9,24 МВт; линия электропередач; солнечная и ветровая электростанции. Реализация проекта намечена на стратегическом угольном месторождении Шивэ Овво Монголии в 200 км к юго-востоку от Улан-Батора, в 400 км от границы с Китаем. Стоимость проекта оценивается в 4 млрд долл. США [18].

Таблица 3

Предлагаемые угольные ТЭЦ в Монголии

Table 3

Proposed coal-fired power plants in Mongolia

Название	Мощность
Багануурская	650 МВт (250 МВт экспорт)
Багануурская	700 МВт
Буруулжит ТЭЦ	600 МВт (2x 300 МВт)
Чандганы ТЭЦ	600 МВт (4 x 150 МВт)
Ою-Толгой ТЭЦ	450 МВт/
Шиве Обоо ТЭЦ	270 МВт (9,24 ГВт)***
Таван-Толгой ТЭЦ	600 МВт (4x 150 МВт)(1,2 ГВт)***
Тельменская ТЭЦ	100 МВт (2 x 50 МВт)
Тевшин Гоби ТЭЦ	600 МВт (2x300 МВт)
Уланбаторская ТЭЦ № 5	450 МВт

Примечание: *название электростанции соответствует месторождению угля, либо города размещения; ** система комбинированного цикла газификации; ***последующее расширение мощности [7, 17] / Note: * the name of the power plant corresponds to the coal field, or city of location; ** combined gasification cycle system; *** subsequent power expansion [7, 17].



Таван-Толгой проект строительства угольной электростанции мощностью 600 МВт планируется в рамках проекта разработки месторождения высококачественного угля Таван Толгой. На месторождении действует угледобывающее предприятие. Первоначально на месторождении использовался дизельный генератор. Мощность электростанции будет достаточной для обеспечения всех видов деятельности в Восточном и Западном участках разрабатываемого месторождения, в том числе обогатительной фабрики, системы водоснабжения и социальных нужд. При стабильном производстве с избыточной мощностью будет продана монгольской сети или Китаю. Планируемый проект электростанция Таван-Толгой уже много лет обсуждается. Рассматривались разные варианты мощности (600 МВт, 450 МВт, 1,2 ГВт). Электростанция считается критической для прогнозируемых потребностей в электроэнергии, в том числе на горнодобывающих предприятиях в регионе Южный Гоби. Ввод электростанции «Таван Толгой» мощностью 600 МВт в эксплуатацию планируется на 2023 г. Стоимость проекта строительства электростанции мощностью 600 МВт оценивается в 0,5 млрд. долл. США [18].

Проект комбинированной тепло-электростанции № 5 на юго-востоке Улан-Батора, в долине Хулиин, ориентиро-

ван на обеспечение теплом и электроэнергией районов городской бедноты и замену стареющих и неэффективных электростанций в столице [18]. Консорциум по реализации проекта включает организации из Франции, Японии, Южной Кореи и Монголии. Ориентировочная стоимость оценивалась в разные годы от 0,65 до 1,5 млрд. долл. США [19]. Экономический спад в Монголии, а также трудности в обеспечении инвестициями могут оставить планы незавершенными. В разработке и реализации различных проектов, связанных с углем по разным направлениям деятельности, участвуют международные компании (КНР, Япония и другие), что, с одной стороны, способствует развитию угольной энергетики Монголии, с другой стороны на международном уровне существуют ограничения на оказание прямой поддержки строительству новых угольных электростанций. Многосторонние банки развития, а также донорские агентства, широко представленные в Монголии, имеют свои стратегии, четко обозначающие цель устойчивого развития энергетического сектора в Монголии. Что касается Европейского банка реконструкции и развития, банк финансирует новые мощности угля только в исключительных обстоятельствах, когда нет других вариантов, что, по мнению многих, имеет место в Монголии [18].

Заключение

В последние годы Монголия активизировала свою деятельность в сфере энергетического сотрудничества. Это направление и рассматривает как важное стратегическое средство усиления внешнеэкономических позиций в данном регионе и один из возможных путей поддержки экономического развития Монголии.

Монголия имеет хорошее геополитическое расположение для прохождения по ее территории ЛЭП сверхвысокого напряжения, для передачи больших объемов мощности и электроэнергии в приграничные страны и обладает значительными запасами энергетических и других природных

ресурсов. Формирование объединенной электроэнергетической системы Монголии может оказать значительную поддержку успешному сотрудничеству со странами СВА. В будущем реализация планов подключения к МГЭО может обеспечить дополнительную гибкость электроснабжения.

Несмотря на то, что в планах развития энергетики кроме угольных есть еще и проекты сооружения ветро- и солнечных электростанций, и ГЭС, уголь считается единственным надежным источником обеспечения безопасности и надежности для развития энергетики и экономики страны. Планы строительства угольных электро-



станций превосходят планы Монголии по возобновляемой энергетике, установленная мощность которых к 2023 г. должна составить 20% от общей установленной мощности, а к 2035 г. – 30–40%.

Основным топливом для производства электроэнергии в Монголии, как для обеспечения внутренних нужд, так и для экспорта, будет уголь, включительно до 2025 и 2035 гг.

Перспективы развития угольной энергетики базируются на наличии значительных ресурсов угля в Монголии в сочета-

нии с расчетами, что инвестирование в угольные электростанции – также самый дешевый вариант для страны. Развитие угольной энергетики Монголии зависит от возможностей увеличения объемов геолого-разведочных работ, развития транспортной и производственной инфраструктур, развития внутреннего и внешнего рынков электроэнергии. Участие международных компаний в реализации проектов сооружения угольных электростанций повышает значительно возможности развития угольной энергетики Монголии.

Библиографический список

1. Saneev B.G., Sokolov A.D., Muzichuk S., Takashvili L.N., Maysyuk E.P., Sokolov D.A., Izhibuldin A.K., Muzichuk R.I. Status and Challenges to Coal Industry for Sustainable Development in North-East Asia and Identification of Opportunities for Subregional Cooperation in the Coal Sector: Intergovernmental Cooperation in North-East Asia, Joint Study, Working Group on Coal. Irkutsk: ESI SB RAS, 2011. 146 p.
2. Mongolian Statistical Yearbook 2015 / Ed. By Mendsaikhan S., Sodkhuu R., Demberel A., Bajikhuu Kh. Ulaan-Baatar: National Registration and Statistics Office, 2016. 413 p.
3. Воробьев Б.М. Уголь мира. Т. III: Уголь Евразии / Под общ. ред. Л.А. Пучкова. М.: Горная книга, 2013. 752 с.
4. Плакиткина Л.С., Плакиткин Ю.А. Угольная промышленность мира и России: анализ, тенденции и перспективы развития. М.: Литература, 2017. 374 с.
5. Yeren-Ulzii, Energy statistics and trade of Mongolia for 2016 country report, 2016 (Joint Study Expert Workshop 13 April 2017). 2017. Seoul. 17 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energy.gov.mn/> (11.10.2018)
6. Yeren-Ulzii Batmunkh. Power sector of Mongolia, regional cooperation possibilities / Work-shop on Energy Connectivity and Transboundary Power Trade in Asia and Pacific: Concept, Barriers and Opportunities (7–9 November 2015, Suzhou, China) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.unescap.org/sites/default/files/Mr.%20Yeren-Ulzii%20-%20Mongolia%20Presentation.pdf> (11.10.2018).
7. Батмунх Сэрээтэр, Стенников В.А., Бат-Эрдэнэ Баяр, Эрдэнэбаатар Алтайн. Потенциал Монголии в международной кооперации азиатского энергетического пространства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 10. С. 65–77. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-65-77
8. Эрчим Хүчний 2016 оны статистик үзүүлэлтүүд. Үйл ажиллагааны тайлан. Улаан-баатар хот. 2017 он. 38 хуудас.
9. Yeren-Ulzii Batmunkh. Mongolian perspective on power interconnection (Joint Conference on Northeast Asia Regional Power Interconnection Irkutsk, Russian Federation 29–31 August 2017) [Электронный ресурс]. URL: https://www.unescap.org/sites/default/files/D1-S2e.%20Mongolian%20Ministry%20of%20Energy_Mr.%20Yeren-Ulzii%20Batmunkh.pdf (11.10.2018)
10. Oyun D. Energy sector of Mongolia, policy and challenges IEEJ. Mongolia, 2017. 42 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://eneken.ieej.or.jp/data/7391.pdf> (11.10.2018)
11. Воропай Н.И., Санеев Б.Г., Батхуяг С., Энхжаргал Х. Энергетическое сотрудничество Монголии и России: современное состояние и стратегические направления // Пространственная Экономика. 2013. № 3. С. 108–122.
12. Углубленный обзор по инвестиционному климату и структуре рынка в энергетическом секторе [Электронный ресурс] // Секретариат Энергетической Хартии. 2013. 108 с. URL: https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/ICMS/ICMS-Mongolia_2013_ru.pdf (11.10.2018)
13. Strategies for Development of Green Energy Systems in Mongolia - Final Report, Mongolia Country Program / The Global Green Growth Institute, Stockholm, 2014, 145 p. [Электронный ресурс]. URL: https://energypedia.info/images/c/c7/Mongolia_Green_Energy_Systems_Development_Final_Report.pdf (11.10.2018)
14. Очирбат Пунсалмаагийн, Батхуяг Содовын. Уголь Монголии: Современное состояние и перспективы развития / Труды конференции «Энергетическая кооперация в Азии: риски и барьеры» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sei.irk.ru/AEC-2012/papers/S4-2%20ru.pdf> (11.10.2018)
15. Saneev B.G., Sokolov A.D. [и др.] Status and Challenges to Coal Industry for Sustainable Development in North-East Asia and Identification of Opportunities for Subregional Cooperation in the Coal Sector: Intergovernmental Cooperation in North-East Asia, Joint Study, Working Group on Coal. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. 147 p. [Электронный ресурс]. URL: <http://isem.irk.ru/publications/book2011000000129/> (11.10.2018)
16. Mongolian Statistical Information [Электронный ресурс]. URL: Service www.1212.mn (11.10.2018)
17. The annual report 2016, geology mining petroleum



heavy industry // Mineral resources and petroleum authority of Mongolia. Ulaanbaatar, 2017. 148 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mrpam.gov.mn/public/pages/66/MPRAMreport2016EN.pdf> (11.10.2018)

18. Ана-Мария Семан MONGOLIA'S ENERGY SECTOR: time for a rethink, APRIL 2017. 40 p. [Электрон-

ный ресурс]. URL: <https://bankwatch.org/wp-content/uploads/2017/06/Mongolia-energy-sector-web.pdf> (11.10.2018)

19. Tserenpurev S., Energy Development in the South Gobi Region, World Bank, May 2008. -11p. Электронный ресурс: http://siteresources.worldbank.org/MONGOLIAEXTN/Resources/4-1_MOFE_SOUTH_GOB_eng.pdf (11.10.2018)

References

1. Saneev B.G., Sokolov A.D., Muzichuk S., Takashvili L.N., Maysyuk E.P., Sokolov D.A., Izhibuldin A.K., Muzichuk R.I. Status and Challenges to Coal Industry for Sustainable Development in North-East Asia and Identification of Opportunities for Subregional Cooperation in the Coal Sector: Intergovernmental Cooperation in North-East Asia, Joint Study, Working Group on Coal. Irkutsk: ESI SB RAS, 2011. 146 p.
2. Mongolian Statistical Yearbook 2015 / Ed. By Mendsaikhan S., Sodkhuu R., Demberel A., Bajikhuu Kh. Ulaan-Baatar: National Registration and Statistics Office, 2016. 413 p.
3. Vorob'ev B.M. *Ugol' mira. T. III: Ugol' Evrazii* [World coal. V. III: Coal of Eurasia]. Moscow: Gornaya kniga Publ., 2013. 752 p.
4. Plakitkina L.S., Plakitkin Yu.A. *Ugol'naya promyshlennost' mira i Rossii: analiz, tendentsii i perspektivy razvitiya* [Coal industry all over the world and in Russia: analysis, trends and development prospects]. Moscow: Literatura Publ., 2017. 374 p.
5. Yeren-Ulzii, Energy statistics and trade of Mongolia for 2016 country report, 2016 (Joint Study Expert Workshop 13 April 2017). 2017. Seoul. 17 с. [Electronic resource]. Available at: <http://www.energy.gov.mn/> (accessed 11 October 2018)
6. Yeren-Ulzii Batmunkh. Power sector of Mongolia, regional cooperation possibilities. Work-shop on Energy Connectivity and Transboundary Power Trade in Asia and Pacific: Concept, Barriers and Opportunities (7–9 November 2015, Suzhou, China) [Electronic resource]. Available at: [http://www.unescap.org/sites/default/files/Mr.%20Yeren-Ulzii%20-%20Mongolia%20Presentation.pdf](https://www.unescap.org/sites/default/files/Mr.%20Yeren-Ulzii%20-%20Mongolia%20Presentation.pdf) (accessed 11 October 2018).
7. Batmunkh S., Stennikov V.A., Bat-Erdene B., Erdenebaatar A. International cooperation potential of Mongolia in Asian energy space. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 10, pp. 65–77. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-65-77 (In Russian)
8. Erchim khychnii 2016 ony statistik yzyyleltyyd. *Yil azhillagaany tailan. Ulaan-baatar khot* [2016 statistics on energy. Activity Report. Ulaanbaatar city. 2017. 38 pages.]. 2017 on. 38 khuudas.
9. Yeren-Ulzii Batmunkh. Mongolian perspective on power interconnection (Joint Conference on Northeast Asia Regional Power Interconnection Irkutsk, Russian Federation 29–31 August 2017) [Electronic resource]. Available at: https://www.unescap.org/sites/default/files/D1-S2e.%20Mongolian%20Ministry%20of%20Energy_Mr.%20Yeren-Ulzii%20Batmunkh.pdf (accessed 11 October 2018)
10. Oyun D. Energy sector of Mongolia, policy and challenges IEEJ. Mongolia, 2017. 42 p. [Electronic resource]. Available at: <https://eneken.ieej.or.jp/data/7391.pdf> (accessed 11 October 2018)
11. Voropai N.I., Saneev B.G., Batkhuyag S., Enkhzhargal Kh. Energy cooperation between Mongolia and Russia: current state and strategic directions. *Prostranstvennaya Ekonomika* [Spatial Economics]. 2013, no. 3, pp. 108–122.
12. Uglublennyi obzor po investitsionnomu klimatu i strukture rynka v energeticheskom sektore [In-depth review of the investment climate and market structure in the energy sector]. Sekretariat Energeticheskoi Khartii [Energy Charter Secretariat]. 2013. 108 p. Available at: https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/ICMS/ICMS-Mongolia_2013_ru.pdf (accessed 11 October 2018)
13. Strategies for Development of Green Energy Systems in Mongolia - Final Report, Mongolia Country Program / The Global Green Growth Institute, Stockholm, 2014, 145 p. [Electronic resource]. Available at: https://energypedia.info/images/c/c7/Mongolia_Green_Energy_Systems_Development_Final_Report.pdf (accessed 11 October 2018)
14. Ochirbat Punsalmaagiin, Batkhuyag Sodovyn. *Ugol' Mongolii: Segodnyashnee sostoyanie i perspektivy razvitiya /trudy konferentsii «Energeticheskaya kooperatsiya v Azii: riski i bar'ery»* [Coal of Mongolia: Current state and development prospects /Proceedings of the Conference "Energy cooperation in Asia: risks and barriers"]. Available at: <http://www.sei.irk.ru/AEC-2012/papers/S4-2%20ru.pdf> (accessed 11 October 2018)
15. Saneev B.G., Sokolov A.D.[et al.] Status and Challenges to Coal Industry for Sustainable Development in North-East Asia and Identification of Opportunities for Subregional Cooperation in the Coal Sector: Intergovernmental Cooperation in North-East Asia, Joint Study, Working Group on Coal. Irkutsk: ISEM SO RAN, 2011. 147 p. [Electronic resource]. Available at: <http://isem.irk.ru/publications/book2011000000129/> (accesses 11 October 2018)
16. Mongolian Statistical Information [Electronic resource]. URL: Service www.1212.mn (accessed 11 October 2018)
17. The annual report 2016, geology mining petroleum



heavy industry // Mineral resources and petroleum authority of Mongolia. Ulaanbaatar, 2017. 148 p. [Electronic resource]. Available at: <https://www.mrpam.gov.mn/public/pages/66/MPRAMreport2016EN.pdf> (accessed 11 October 2018)

18. Ana-Maria Seman MONGOLIA'S ENERGY SECTOR: time for a rethink, APRIL 2017. 40 p. [Electronic

resource]. URL: <https://bankwatch.org/wp-content/uploads/2017/06/Mongolia-energy-sector-web.pdf> (accessed 11 October 2018)

19. Tserenpurev S. Energy Development in the South Gobi Region, World Bank, May 2008. -11p. Electronic resource: http://siteresources.worldbank.org/MONGOLIAEXTN/Resources/4-1_MOFE_SOUTH_GOB_eng.pdf (accessed 11 October 2018)

Критерии авторства

Такайшвили Л.Н., Соколов А.Д. и Батхуяг Содовын заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Takaishvili L.N., Sokolov A.D. and Batkhuyag Sodovyn 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Такайшвили Людмила Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «ТЭК Сибири и Дальнего Востока», e-mail: luci@isem.irk.ru

Соколов Александр Даниилович, доктор технических наук, заведующий лабораторией «ТЭК Сибири и Дальнего Востока», e-mail: sokolov@isem.irk.ru

Содовын Батхуяг, профессор, e-mail: sbatkhuyag@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyudmila N. Takaishvili, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of "Fuel and Energy Complex of Siberia and the Far East", e-mail: luci@isem.irk.ru

Aleksandr D. Sokolov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of "Fuel and Energy Complex of Siberia and the Far East", e-mail: sokolov@isem.irk.ru

Batkhuyag Sodovyn, Professor, e-mail: sbatkhuyag@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.3.051.24

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-148-157>

Учет промежуточного отбора мощности в математической модели полуволновой линии электропередачи

© А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов, В.П. Кобылин

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация

Резюме: В данной работе проведено изучение математической модели полуволновой линии электропередачи с промежуточным отбором мощности. Для разработки математической модели полуволновой линии электропередачи использовались методы прямого вычисления параметров схем замещения и эквивалентного четырехполюсника. Расчеты производились с помощью математического редактора MathCAD. Представленные результаты раскрывают особенности учета отдельных элементов математической модели полуволновой линии (которые включаются в соответствующие узлы электропередачи) и их влияние на расчеты параметров режима. Показано, что для полного и достоверного расчета параметров режима в любой точке полуволновой электропередачи необходимо иметь в виду волновой характер изменения параметров линии. В противном случае результаты расчетов принимают противоречивый характер. Наряду с этим для расчета параметров режима в промежуточных точках следует учитывать, что параметры протяженных линий электропередач имеют распределенный характер, а параметры включаемых элементов – сосредоточенный.

Ключевые слова: полуволновая электропередача, математическое моделирование, схема замещения, протяженные электропередачи, промежуточный отбор мощности, расчеты режимов электропередачи

Информация о статье: Дата поступления 14 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 16 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Хоютанов А.М., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Кобылин В.П. Учет промежуточного отбора мощности в математической модели полуволновой линии электропередачи. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):148–157. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-148-157.

Accounting of intermediate power take-off in the mathematical model of the half-wavelength transmission line

Alexander M. Khoютanov, Pavel F. Vasiliev, Gennady I. Davydov, Vitaly P. Kobylin

Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

Abstract: The paper studies the mathematical model of the half-wavelength transmission line with intermediate power take-off. The methods of direct calculation of parameters of an equivalent circuit and a four-terminal network are used for the development of the mathematical model of the half-wavelength transmission line with intermediate power takeoff. The calculations are carried out using MathCAD. The presented results demonstrate the features of accounting the individual elements of the mathematical model of the half-wavelength transmission line, which are included in the appropriate power transmission nodes, and their effect on regime parameter calculation. It is shown that the wave character of line parameters variations should be taken into account for the complete and reliable calculation of the regime parameters in any point of the half-wavelength transmission line. Otherwise, the calculation results are contradictory. At the same time, the calculation of regime parameters in the intermediate points should consider that the parameters of long distance transmission lines have a distributed character while the nature of the included element parameters is concentrated.

Keywords: half-wavelength transmission line, mathematical modeling, equivalent circuit, long distance transmission line, power take-off, power transmission regime calculations

Information about the article: Received November 14, 2018; accepted for publication January 16, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Khoютanov A.M., Davydov G.I., Vasiliev P.F., Kobylin V.P. Accounting of intermediate power take-off in the mathematical model of the half-wavelength transmission line. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):148–157. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-148-157.

Введение

Полуволновые и настроенные на полуволну электропередачи имеют высокий запас статической устойчивости [1–14]. Использование таких электропередач в качестве магистральных и системообразующих значительно повысит надежность энергообъединений и позволит передавать большие потоки мощности на дальние расстояния. В ходе натурного эксперимента 1968 г. доказана работоспособность полуволновой электропередачи в качестве транзитной, но для расширения эксплуатационных возможностей необходимо исследовать возможность присоединения промежуточных пунктов с целью отбора или взаимного обмена энергией [2]. Для этого требуется определить распределение основных режимных параметров и получить некоторые расчетные выражения для описания основных закономерностей процессов.

Материалы и методы исследования

Расчет и анализ установившегося режима сверхдальних линий электропередач из-за больших погрешностей при расчетах требует учета распределенности линейных параметров. Расчет можно производить по параметрам Π - или T -образных схем замещения (рис. 1) или по обобщенным параметрам четырехполюсника $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ (рис. 2), которые определяются по удельным параметрам линии. В схемах замещения параметры Π - и T -образных схем замещения представляют собой продольные сопротивления (Z_{Π} , Z_{T1} , Z_{T2}) и поперечные проводимости ($Y_{\Pi1}$, $Y_{\Pi2}$, Y_T) линии, определяемые через удельные параметры электропередачи на 1 км длины линии: удельное погонное активное (r_0) и индуктивное (x_0) сопротивление проводов, активную (g_0) и емкостную (b_0) поперечные проводимости линии.

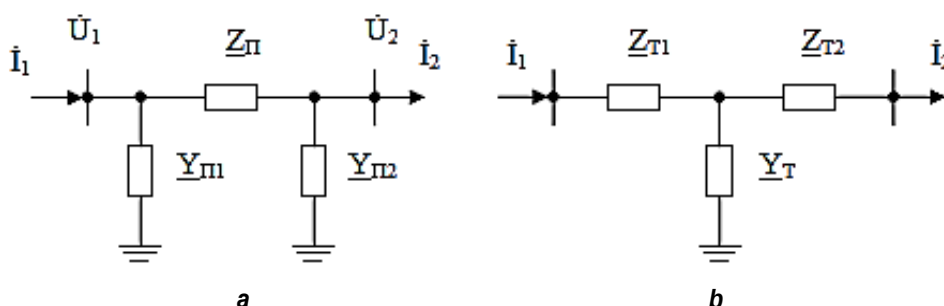


Рис. 1. Схема замещения линии электропередачи: а – Π -образная; б – T -образная
Fig. 1. Equivalent circuit of a power transmission line: a – Π -circuit; b – T -circuit

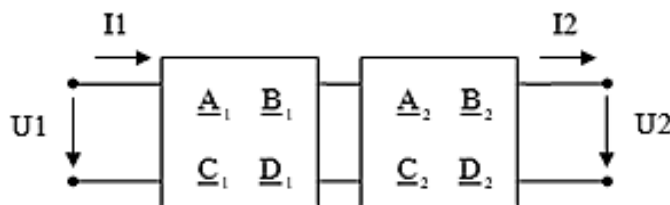


Рис. 2. Каскадное соединение четырехполюсников
Fig. 2. Cascade connection of four-terminal networks

Так как Π -образная схема в более полной мере отражает характеристики режима электропередачи, эта схема будет использоваться в качестве исследуемой. Каждый элемент схемы замещения можно представить в виде отдельного четырехполюсника и по теории каскадного соединения получить результирующий четырехполюсник (рис. 3).

Параметры общего четырехполюсника по основам теории цепей находятся как



$$\begin{bmatrix} A_{12} & B_{12} \\ C_{12} & D_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$$

Таким образом, результирующая матрица равна произведению матриц каскадно-соединенных четырехполюсников. Связь между режимными параметрами линии электропередачи с помощью теории четырехполюсников принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2, \end{aligned}$$

где A, B, C, D – коэффициенты четырехполюсника; $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ – комплексы напряжений в начале и конце электропередачи; $\dot{I}_1, \dot{I}_2$ – комплексы токов в начале и конце электропередачи.

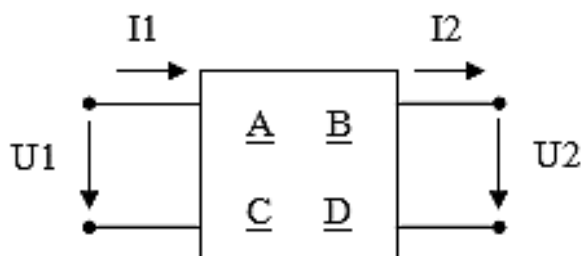


Рис. 3. Схема четырехполюсника
Fig. 3. Four-terminal network circuit

В этом случае в матричном виде связь между параметрами П-образной схемы замещения и коэффициентами четырехполюсника будет следующей:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \underline{Y}_{\Pi 1} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & \underline{Z}_{\Pi} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \underline{Y}_{\Pi 2} & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 + \underline{Y}_{\Pi 2} \underline{Z}_{\Pi} & \underline{Z}_{\Pi} \\ \underline{Y}_{\Pi 1} + \underline{Y}_{\Pi 2} + \underline{Y}_{\Pi 1} \underline{Y}_{\Pi 2} \underline{Z}_{\Pi} & 1 + \underline{Y}_{\Pi 1} \underline{Z}_{\Pi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{vmatrix}.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Основой всех методов расчета режима линии являются уравнения длинной линии:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cosh \gamma_0 L + \dot{I}_2 \underline{Z}_B \sinh \gamma_0 L, \\ \dot{I}_1 &= \dot{U}_2 \frac{\sinh \gamma_0 L}{\underline{Z}_B} + \dot{I}_2 \cosh \gamma_0 L, \\ \gamma_0 &= \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)}, \\ \underline{Z}_B &= \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} \end{aligned}$$



где $\underline{\gamma}_0$ – коэффициент распространения электромагнитной волны; L – длина электропередачи; $\underline{Z}_B$ – волновое сопротивление линии.

Откуда можно выразить коэффициенты четырехполюсника через параметры режима:

$$\underline{A} = ch \underline{\gamma}_0 L; \quad \underline{C} = \frac{sh \underline{\gamma}_0 L}{\underline{Z}_B};$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_B sh \underline{\gamma}_0 L; \quad \underline{D} = ch \underline{\gamma}_0 L;$$

Тогда получаются следующие соотношения:

$$1 + \underline{Y}_{\Pi 2} \underline{Z}_{\Pi} = ch \underline{\gamma}_0 L; \quad \underline{Y}_{\Pi 1} + \underline{Y}_{\Pi 2} + \underline{Y}_{\Pi 1} \underline{Y}_{\Pi 2} \underline{Z}_{\Pi} = \frac{sh \underline{\gamma}_0 L}{\underline{Z}_B};$$

$$\underline{Z}_{\Pi} = \underline{Z}_B sh \underline{\gamma}_0 L; \quad 1 + \underline{Y}_{\Pi 1} \underline{Z}_{\Pi} = ch \underline{\gamma}_0 L;$$

И параметры схемы замещения можно выразить как:

$$\underline{Z}_{\Pi} = \underline{Z}_B sh \underline{\gamma}_0 L = r_{\Pi} + jx_{\Pi};$$

$$\underline{Y}_{\Pi 1} = \underline{Y}_{\Pi 2} = \frac{ch \underline{\gamma}_0 L - 1}{\underline{Z}_B sh \underline{\gamma}_0 L} = \frac{1}{\underline{Z}_B} th \underline{\gamma}_0 \frac{L}{2} = g_{\Pi} + jb_{\Pi}$$

Часто при расчетах протяженных линий вместо географической длины линии используется понятие волновой длины, выраженной в градусах – $\lambda = \beta_0 L$, где β_0 – коэффициент изменения фазы, который при $f = 50$ Гц и $u = 300000$ км/с принимает значение $\beta_0 = 1,05 \cdot 10^{-3}$ рад/км.

Через волновую длину линии выводится зависимость коэффициента электромагнитной волны:

$$\underline{\gamma}_0 L = j\lambda + \lambda \frac{r_0}{2x_0},$$

подставляя полученное выражение вместо аргумента функции и, проводя преобразования, получаем:

$$\begin{cases} sh \underline{\gamma}_0 L = \lambda \frac{r_0}{2x_0} \cos \lambda + j \sin \lambda; \\ ch \underline{\gamma}_0 L = j \lambda \frac{r_0}{2x_0} \sin \lambda + \cos \lambda; \\ th \underline{\gamma}_0 L = \lambda \frac{r_0}{2x_0} \frac{1}{\cos^2 \lambda} + jtg \lambda. \end{cases}$$

Опуская промежуточные преобразования, приведем расчетные выражения:



$$\underline{Z}_{\Pi} = r_{\Pi} + jx_{\Pi} = Z_B \frac{r_0}{2x_0} (\lambda \cos \lambda + \sin \lambda) + j Z_B \sin \lambda;$$

$$\underline{Y}_{\Pi 1} = \underline{Y}_{\Pi 2} = g_{\Pi} + jb_{\Pi} = \frac{1}{Z_B} \cdot \frac{r_0}{2x_0} \cdot \frac{\lambda - \sin \lambda}{1 + \cos \lambda} + j \frac{\operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}}{Z_B}.$$

Однако полученные параметры схемы замещения справедливы для линий, электрическая длина которых не превышает четверти волны ($l < 1500$ км). При расчетах для линий с электрической длиной более четверти волны ($l > 1500$ км) активная составляющая продольного сопротивления принимает отрицательные значения, что характеризует линию как генерирующую электрическую энергию, что является ошибочным. В то же время особенностью идеальной полуволновой линии является равенство модулей токов и напряжений по концам электропередачи [3]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 L + \dot{I}_2 \underline{Z}_B \operatorname{sh} \gamma_0 L = -\dot{U}_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{U}_2 \frac{\operatorname{sh} \gamma_0 L}{\underline{Z}_B} + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 L = -\dot{I}_2. \end{aligned}$$

Это равенство модулей токов и напряжения по концам линии длиной 3000 км сохраняется при любой величине передаваемой мощности (рис. 4). Сдвиг по фазе векторов напряжения и токов на угол 180° также остается постоянным при различных нагрузках линии [3].

Матрица параметров такой полуволновой линии является единичной и имеет следующий вид:

$$M_{\pi} = \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

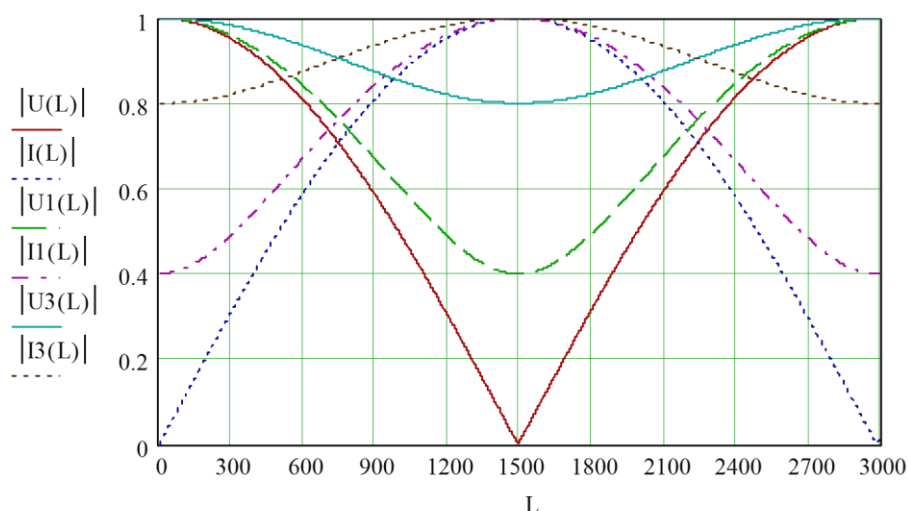


Рис. 4. Модули напряжения и тока вдоль полуволновой линии при различной передаваемой мощности
Fig. 4. Modules of voltage and current along the half-wavelength transmission line at different transmitted power



Поэтому для того, чтобы схема замещения в полной мере отражала реальные параметры линии, следует провести модификацию традиционной схемы замещения с помощью введения в схему идеального трансформатора T_π (рис. 5) [1]. При этом матрица параметров идеальной полуволновой линии будет совпадать с матрицей параметров идеального трансформатора.

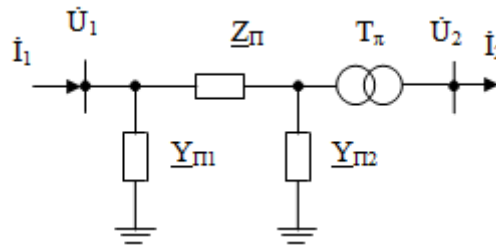


Рис. 5. П-образная схема замещения полуволновой электропередачи
Fig. 5. U-shaped equivalent circuit of the half-wavelength transmission power line

Тогда параметры схемы замещения будут определены по следующим соотношениям:

$$\underline{Z}_\pi = r_\pi + jx_\pi = Z_B \frac{r_0}{2x_0} (\lambda \cos(\lambda - \pi) + \sin(\lambda - \pi)) + j Z_B \sin(\lambda - \pi);$$

$$\underline{Y}_{\pi 1} = \underline{Y}_{\pi 2} = g_\pi + jb_\pi = \frac{1}{Z_B} \cdot \frac{r_0}{2x_0} \cdot \frac{\lambda - \sin(\lambda - \pi)}{1 + \cos(\lambda - \pi)} + j \frac{\operatorname{tg} \frac{(\lambda - \pi)}{2}}{Z_B}$$

В основе разработки математической модели полуволновой электропередачи с промежуточным отбором мощности использован метод эквивалентного четырехполюсника, который исключает преобразования схем, упрощает определение собственных, взаимных и входных сопротивлений при расчете режимов сложных электропередач, имеющих различные включения в линию (компенсирующие устройства, промежуточные отборы).

Как известно, матрицу параметров эквивалентного четырехполюсника, замещающего всю линию электропередачи, можно найти с помощью произведения матриц каскадно-соединенных четырехполюсников (рис. 6) [4]:

$$\begin{bmatrix} \underline{A}_3 & \underline{B}_3 \\ \underline{C}_3 & \underline{D}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{B}_1 \\ \underline{C}_1 & \underline{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{A}_2 & \underline{B}_2 \\ \underline{C}_2 & \underline{D}_2 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \underline{A}_m & \underline{B}_m \\ \underline{C}_m & \underline{D}_m \end{bmatrix}.$$

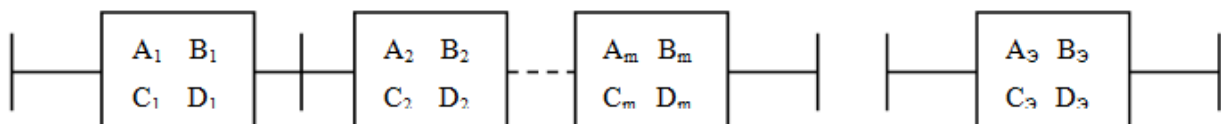


Рис. 6. Представление эквивалентного четырехполюсника
Fig. 6. Representation of a four-terminal equivalent network

Используя это свойство, выделяется четыре участка по всей длине электропередачи: участок от одного конца электропередачи до места отбора мощности, участок с точкой отбора,



участок от места отбора до другого конца электропередачи и идеальный полуволновый трансформатор, который корректирует значения параметров схемы замещения до реальных значений (рис. 7).

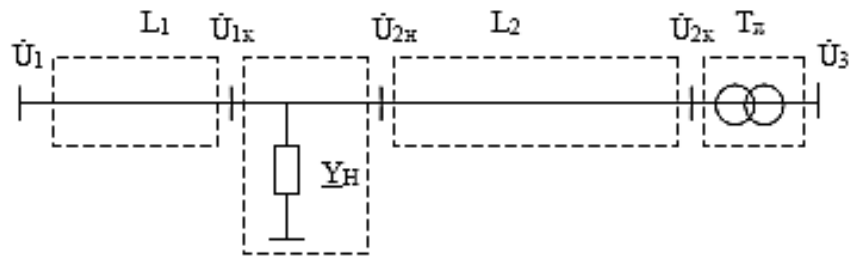


Рис. 7. Схема линии с промежуточным отбором мощности
Fig. 7. Circuit of a line with an intermediate power take-off

Рассматривая промежуточный отбор мощности как элемент системы электроснабжения с сосредоточенными параметрами, включаемый в линию параллельно, для среднего участка можно использовать Т-образную схему замещения при $\underline{Z}_{T1} = \underline{Z}_{T2} = 0$ (рис. 8).

При этом:

$$\begin{cases} A = 1; & B = 0; \\ C = \underline{Y} & D = 1, \end{cases}$$

где проводимость $\underline{Y}$ определяется типом элемента, включенного в линию.

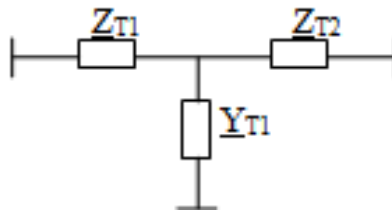


Рис. 8. Элементы с сосредоточенными параметрами, включаемые в линию параллельно
Fig. 8. Elements with concentrated parameters connected in a line in parallel

Подставив выражения для параметров отдельных четырехполюсников, окончательно получим:

$$\begin{aligned} \underline{A}_9 &= -\cos \lambda - j\underline{Z}_B \cos \lambda_2 \frac{\dot{S}_{BH}}{U_{НОМ}^2}; & \underline{B}_9 &= -j\underline{Z}_B \sin \lambda - j\underline{Z}_B^2 \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \frac{\dot{S}_{BH}}{U_{НОМ}^2}; \\ \underline{C}_9 &= -j \frac{1}{\underline{Z}_B} \sin \lambda - \cos \lambda_1 \cos \lambda_2 \frac{\dot{S}_{BH}}{U_{НОМ}^2}; & \underline{D}_9 &= -\cos \lambda - j\underline{Z}_B \cos \lambda_1 \sin \lambda_2 \frac{\dot{S}_{BH}}{U_{НОМ}^2}. \end{aligned}$$

При заданных параметрах режима конца или начала электропередачи параметры противоположных режимов определяются как:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A}_9 \cdot \dot{U}_3 + \underline{B}_9 \cdot \dot{I}_3; \\ \dot{I}_1 = \underline{C}_9 \cdot \dot{U}_3 + \underline{D}_9 \cdot \dot{I}_3; \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{U}_3 = \underline{D}_9 \cdot \dot{U}_1 - \underline{B}_9 \cdot \dot{I}_1; \\ \dot{I}_3 = -\underline{C}_9 \cdot \dot{U}_1 + \underline{A}_9 \cdot \dot{I}_1. \end{cases}$$



Параметры объединенных четырехполюсников определяются путем перемножения матриц, входящих в эти четырехполюсники [4]. Например, ток и напряжение в конце второго участка по заданным параметрам конца электропередачи находятся как:

$$\begin{vmatrix} \underline{A}_{o2} & \underline{B}_{o2} \\ \underline{C}_{o2} & \underline{D}_{o2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{A}_1 & \underline{B}_1 \\ \underline{C}_1 & \underline{D}_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{A}_2 & \underline{B}_2 \\ \underline{C}_2 & \underline{D}_2 \end{vmatrix}.$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{2н} = \underline{A}_{o2} \cdot \dot{U}_3 + \underline{B}_{o2} \cdot \dot{I}_3; \\ \dot{I}_{2н} = \underline{C}_{o2} \cdot \dot{U}_3 + \underline{D}_{o2} \cdot \dot{I}_3. \end{cases}$$

Выводы

Таким образом, для того, чтобы математическая модель полуволновой электропередачи в полной мере отражала протекающие в ней процессы, а также для расчетов основных параметров режима по концам и в промежуточных точках электропередачи, значений напряжения и токов в ее узлах следует ввести в схему замещения полуволновый трансформатор, который приводит значения отдельных элементов схемы замещения к привычному для понимания виду. Для учета промежуточного отбора мощности выделяется несколько участков по всей длине электропередачи: участок от одного конца электропередачи до места отбора мощности, участок с точкой отбора, участок от места отбора до другого конца электропередачи или до следующего участка с отбором мощности и т.д., а также участок с идеальным полуволновым трансформатором, который корректирует значения параметров схемы замещения до реальных значений. Все протяженные участки на схеме замещаются с учетом распределенности параметров. Включения в линию (отбор мощности) учитываются как элементы с сосредоточенными параметрами. При заданных параметрах режима конца или начала электропередачи параметры противоположных режимов определяются по приведенным формулам.

Библиографический список

1. Зильберман С.М., Самородов Г.И. Сверхдальние электропередачи полуволнового типа. Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2010. 327 с.
2. Хоютанов А.М., Васильев П.Ф., Кобылин В.П. Повышение надежности и эффективности сверхдальних межсистемных связей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2017. № 3. С. 67–75.
3. Кобылин А.В., Самородов Г.И., Зильберман С.М., Кобылин В.П., Ли-Фир-Су Р.П., Афанасьев Д.Е., Хоютанов А.М., Давыдов Г.И. Промежуточный отбор мощности из полуволновой электропередачи // Электричество. 2015. № 6. С. 4–11.
4. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Изд-во МЭИ, 2007. 488 с.
5. Нестеров А.С., Давыдов Г.И., Васильев П.Ф. Альтернативное решение развития электроснабжения потребителей Арктической зоны Республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2013. Т. 10. № 4. С. 54–58.
6. Щербаков В.К. Технические и экономические характеристики настроенных электропередач. Новосибирск: Наука, 1965. 68 с.
7. Щербаков В.К. Возможности передач настроенных на полуволну // Вопросы дальних электропередач. 1960. С. 3–20.
8. Buchholz B.M. Lectures “Electricity grids”, “Energy automation” and “High voltage technologies” within the education program “Power transmission and distribution – the technologies at a glance”. Siemens Power Academy Nuremberg, 2003–2009. URL: <http://producttraining.siemens.com/power-academy/index.jsp?L=EN> (12 February 2009).
9. Herrmann H.J., Ludwig A., Fohrig H. German Practice of Transmission System Protection // CIGRE, Study Committee B5 Colloquium paper 306. Madrid, October 15–20. 2007.
10. Buchholz B.M., Stychynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Berlin: Springer, 2016. 396 p.
11. Зильберман С.М., Самородов Г.И. Оценка эффективности применения полуволновой передачи электроэнергии в Южной Африке // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 5. С. 115–124.



12. Самородов Г.И., Красильникова Т.Г. Прогрессивные технологии передачи электроэнергии на переменном токе на дальние и сверхдальние расстояния // Энергетическая политика. 2013. № 5. С. 31–38.
13. Давыдов Г.И., Кобылин А.В., Ли-Фир-Су Р.П., Седалищев В.А., Нестеров А.С. Альтернативные источники электроэнергии для снабжения предприятий промышленных центров Арктической зоны Якутии // Электротехника. 2017. № 9. С. 84–88.
14. Buchholz B.M. Lectures «Electricity grids», «Energy automation» and «High voltage technologies» within the education program «Power transmission and distribution – the technologies at a glance». Siemens Power Academy Nuremberg, 2003–2009. URL: [//product-training.siemens.com/power-academy/index.jsp?L=EN](http://product-training.siemens.com/power-academy/index.jsp?L=EN) (12.02.2009).

References

1. Zilberman S.M., Samorodov G.I. *Sverkhdal'nie elektropredachi poluvolnovogo tipa* [Ultra-long half-wavelength power transmission lines]. Novosibirsk: Siberian State University of Water Transport Publ. 2010. 321 p. (In Russian).
2. Khoiutanov A.M., Vasilyev P.F., Kobylin V.P. Increasing of reliability and efficiency of long-distance intersystem communications. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State university. Ser. Power Engineering], 2017, no. 3, pp. 67–75 (In Russian).
3. Kobylin A.V., Samorodov G.I., Zilberman S.M., Kobylin V.P., Li-Fir-Su R.P., Afanasyev D.E., Khoiutanov A.M., Davydov G.I.M. Intermediate Power Tapping from a Half-Wave Power Transmission Line. *Elektrichestvo* [Electricity], 2015, no. 6, pp. 4–11. (In Russian).
4. Ryzhov Y.P. *Dal'nie elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Ultra-high voltage long-distance power transmission lines]. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 2007. 488 p. (In Russian).
5. Nesterov A.S., Davydov G.I., Vasil'ev P.F. Alternative decision of development of consumers electricity supply in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova* [Vestnik of North-Eastern Federal University]. 2013, vol. 10, no. 4, pp. 54–58. (In Russian).
6. Shcherbakov V.K. *Tekhnicheskie i ekonomicheskie kharakteristiki nastroennykh elektropredach* [Technical and economic characteristics of tuned power transmissions]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1965, 68 p. (In Russian).
7. Shcherbakov V.K. Capabilities of half-wavelength tuned transmissions. *Voprosy dal'nikh elektropredach* [Issues of Long-Distance Power Transmission], 1960, pp. 3–20. (In Russian).
8. Buchholz B.M. Lectures “Electricity grids”, “Energy automation” and “High voltage technologies” within the education program “Power transmission and distribution – the technologies at a glance”. Siemens Power Academy Nuremberg, 2003–2009. Available at: [//producttraining.siemens.com/power-academy/index.jsp?L=EN](http://producttraining.siemens.com/power-academy/index.jsp?L=EN) (accessed 12 February 2009).
9. Herrmann H.J., Ludwig A., Fohrig H. et al. German Practice of Transmission System Protection // CIGRE, Study Committee B5 Colloquium paper 306. Madrid, October 15–20, 2007.
10. Buchholz B.M., Stychynski Z. *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Berlin: Springer, 2016, 396 p.
11. Zil'berman S.M., Samorodov G.I. Efficiency assessment of application of half wave technology for power transmission in Southern Africa. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2009, no. 5, pp. 115–124. (In Russian).
12. Samorodov G.I., Krasil'nikova T.G. The progressive technologies of alternating current transmission for long and extra long distances. *Energeticheskaya politika* [Energy Policy], 2013, no. 5, pp. 31–38. (In Russian)
13. Davydov G.I., Kobylin A.V., Li-Fir-Su R.P., Sedalishchev V.A., Nesterov A.S. Alternative sources of electric power for supplying enterprises of industrial centers of the Yakutia Arctic zone. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2017, no. 9, pp. 84–88. (In Russian).
14. Buchholz B.M. Lectures “Electricity grids”, “Energy automation” and “High voltage technologies” within the education program “Power transmission and distribution – the technologies at a glance”. Siemens Power Academy Nuremberg, 2003–2009. URL: [//product-training.siemens.com/power-academy/index.jsp?L=EN](http://product-training.siemens.com/power-academy/index.jsp?L=EN) (12 February 2009).

Критерии авторства

Хоютанов А.М., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Кобылин В.П. произвели расчеты математической модели полуволновой линии электропередачи, где использовали методы прямого вычисления параметров схем замещения и эквивалентного четырехполюсника. Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Khoyutanov A.M., Vasilyev P.F., Davydov G.I., Kobylin V.P. calculated a mathematical model of a half-wavelength transmission line where the methods of direct calculation of equivalent circuit and equivalent four-terminal network parameters were used. The authors 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хоютанов Александр Михайлович, ведущий инженер отдела электроэнергетики, e-mail: shuriklater@mail.ru

Васильев Павел Филиппович, кандидат технических наук, заведующий отделом электроэнергетики, e-mail: kb-8@mail.ru

Давыдов Геннадий Иванович, младший научный сотрудник отдела электроэнергетики, e-mail: dav_gen@mail.ru

Кобылин Виталий Петрович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетики, e-mail: v.p.kobylin@iptpn.ysn.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander M. Khoютanov, Chief Engineer of the Electrical Power Department, e-mail: shuriklater@mail.ru

Pavel F. Vasiliev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Electrical Power Department, e-mail: kb-8@mail.ru

Gennady I. Davydov, Junior Researcher of the Electrical Power Department, e-mail: dav_gen@mail.ru

Vitaly P. Kobylin, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Electrical Power Department, e-mail: v.p.kobylin@iptpn.ysn.ru



Применение красного шлама в качестве модификатора при грануляции металлургических шлаков

© А.Б. Лебедев, В.А. Утков, В.Ю. Бажин

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская федерация

Резюме: Цель – изучение сорбционных свойств красного шлама – отхода глиноземного производства. В процессе переработки на участках припечной грануляции шлака происходит повышенное выделение сероводорода в атмосферу, отравляя воздух. Применение этого красного шлама в качестве поглотителя токсичных соединений серы, содержащихся в промышленных газах, может составить альтернативу дорогостоящим извести и известняку. Для изучения сорбционных свойств красного шлама была собрана лабораторная установка гран-бассейна. В качестве охлаждающей жидкости использовалась пульпа красного шлама с соотношением Т:Ж = 1:5. Для расплавления доменного шлака использовалась высокотемпературная печь с открытым дном. При достижении критической температуры расплавленный материал, попадая в воду, гранулировался. Для определения содержания вредных соединений в атмосфере пространства установки использовался портативный прибор ПГА-200. Установлено оптимальное соотношение компонентов состава красного шлама для максимальной степени улавливания соединений серы, что подтверждается его поглотительной активностью. Изучены сорбционные свойства материала. Высокая его поглотительная способность обусловлена отношением оксидов кальция, магния и алюминия к оксиду кремния. Установлено, что модифицированный граншлак, по сравнению с обычным граншлаком, обладает повышенными техническими свойствами (скорость сушки и затраты энергии на размол). На основе проведенных лабораторных исследований установлено, что красный шлак может применяться в качестве нового сорбента как для систем очистки атмосферного воздуха, так непосредственно и на рабочем участке. Применение красного шлама в качестве модификатора при грануляции шлака имеет большое преимущество по сравнению с другими способами грануляции, использующими оксид и гидроксид кальция. Добавка является не только десульфуратором, но и служит ценной составляющей для переработки шлака с дальнейшим применением его в строительной индустрии – производстве цемента, керамзита и т.д., что улучшает технические характеристики этого продукта.

Ключевые слова: красный шлак, грануляция, парогазовые выбросы, сера, пемза, сорбционная способность, гранулированный шлак

Благодарности: Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (регистрационный номер проекта 11.4098.2017/ПЧ от 01.01.2017).

Информация о статье: Дата поступления 21 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 25 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Лебедев А.Б., Утков В.А., Бажин В.Ю. Применение красного шлама в качестве модификатора при грануляции металлургических шлаков. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):158–168. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-158-168.

Use of red mud as a modifier in granulation of metallurgical slags

Andrey B. Lebedev, Vladimir A. Utkov, Vladimir Yu. Bazhin

St. Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT: The article studies the sorption properties of red mud, which is the waste of alumina production. Processing of slag is accompanied with the increased release of hydrogen sulfide into the atmosphere in the areas of near furnace slag granulation. This has an adverse effect on human health. The use of red mud as an absorber of toxic sulfur compounds contained in industrial gases can be an alternative to expensive lime and limestone. A laboratory installation of the granulation basin was assembled to study red mud sorption properties. Red mud pulp was used as a coolant with the ratio of S:L = 1:5. A high-temperature open-bottom furnace was used to melt blast furnace slag. Having reached the critical temperature, the molten material got into water and granulated. A portable device PGA-200 was used to determine the content of harmful compounds in the atmosphere of the installation space. The optimum ratio of the components of the red mud composition was determined for the maximum trapping degree of sulfur compounds, which was confirmed by its absorption activity. The sorption properties of the material were studied. It was found out that its high absorption capacity was determined by the proportion of calcium, magnesium and aluminum oxides to silicon oxide. It was determined that the modified granulated slag had improved technical properties including drying speed and granulation energy costs as compared to conventional granulated slag. Conducted laboratory studies allowed to conclude that red mud could be used as a new



sorbent both for air purification systems and directly at the work site. The use of red mud as a slag granulation modifier has a great advantage over other granulation methods using calcium oxide and calcium hydroxide. The additive is not only a desulfurizing agent, but also serves as a valuable component for slag processing with its further application in construction industry, e.g. in the production of cement, expanded clay, etc., which improves product technical characteristics.

Keyword: red mud, granulation, gas-vapor emissions, sulfur, pumice stone, sorption capacity, granulated slag

Acknowledgements: The work has been carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project registration number is 11.4098.2017/ ПЧ from 1 January 2017).

Information about the article: Received December 21, 2018; accepted for publication January 25, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Lebedev A.B., Utkov V.A., Bazhin V.Yu. Use of red mud as a modifier in granulation of metallurgical slags. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):158–168. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-158-168.

Введение

Отходы черной и цветной металлургии являются побочными продуктами технологического металлургического комплекса. Использование доменных шлаков черной металлургии дает возможность получать материалы для строительной отрасли. А утилизация отходов производства цветной металлургии открывает возможности для новых материалов.

Шлаки доменного производства с пониженным содержанием оксида кальция имеют более спеченную структуру, что позволяет их использовать для изготовления шлаковой пемзы, литого щебня, а также для изготовления шлаковой ваты. Обычно для получения 2 м³ шлаковой пемзы необходимо переработать около 1 т шлака. Кислые шлаки имеют в своем составе повышенное содержание кремнезема и глинозема, что дает наилучшие условия для вспучивания материала по сравнению с другими шлаками, которые тоже обладают этим свойством, но в меньшей степени. Из шлаков, склонных к силикатному распаду, также можно производить вышеуказанные продукты, но для этого потребуются большой объем затрат на операции технологического комплекса [1].

Целесообразно подвергать грануляции шлаки, имеющие высокое содержание кальция. Высококальциевый шлак, прошедший грануляцию, может быть использован для производства продуктов цементной отрасли. Закристаллизовавшиеся кислые шлаки устойчивы к повышенным температурам, проявляют стойкость в щелочных и кислых средах. Благодаря таким свойствам, их

применяют для изготовления жаростойких марок цементов, а также для цементов, используемых в железо-бетонном строительстве, которые в процессе эксплуатации подвергаются воздействию агрессивной среды [2]. При производстве шлакопортландцемента наилучшим полуфабрикатом служит шлак доменного производства, который проходит процесс грануляции, что является подготовительной операцией для дальнейшего использования.

Гранулированные шлаки являются активным материалом для взаимодействия с другими веществами, поэтому после дополнительной термической обработки получают высококачественные цементы. Производство цемента не требует больших затрат и многочисленных производственных операций. Вся технология складывается из просушки гранулированного шлака и его дроблении примерно до значений 3000–5000 см²/г (тонкость помола значительно выше, чем у обычных цементов) [3].

Гранулированные шлаки также применяют при производстве шлакопортландцемента как специальной добавки для повышения прочности, трещиностойкости и теплостойкости бетонов. В производстве шлакощелочных цементов также применяется гранулированный шлак.

Применение шлаков цветной металлургии также решает проблему их утилизации. После извлечения драгоценных металлов из шлаков цветной металлургии песок, гравий и щебень не подвержены распаду, что открывает широкий спектр применения. Никелевые шлаки относятся к кислым и яв-



ляются гидравлически неактивными. Средняя плотность шлаков медного производства (значения также высоки и для никелевых шлаков) – 3300–3800 кг/м³, водопоглощение – 0,1–0,6%, предел прочности при сжатии составляет 120–300 МПа. Водорастворимые соединения в алюминиевых шлаках составляют 75–85% от массы. После длительной выдержки на открытых воздушных пространствах или в воде происходит выщелачивание материала, после чего его можно использовать как сырье для производства сульфоалюминатного клинкера [4].

Шлаки цветной металлургии пользуются меньшим спросом по сравнению со шлаками черной металлургии, но (в перспективе) допустимо их использование в производстве различных строительных материалов. Химический состав этих шлаков представлен в табл. 1.

Из 1,7–2 т железной руды и флюсов выход чугуна и шлака составляет, соответственно, 1 т и 0,6–0,7 т. На 1 т выплавленной стали приходится 0,2–0,3 т шлака из 2–2,3 т железной руды и плавней. В ваграночных и электропечах выход шлаков составляет 0,1–0,4 т на 1 т металла [5–7].

Цель исследования

Показать возможность применения красного шлама в качестве модифицирующей добавки, применяемой в технологии грануляции шлака. Это позволит решить задачу утилизации техногенных отходов, которые ежегодно накапливаются в больших объемах вблизи металлургических предпри-

ятий, что отрицательно сказывается на окружающей среде. Дальнейшее снижение экономической составляющей путем замены традиционно используемых материалов, нуждающихся в предварительной обработке на предлагаемый отход глиноземного производства – красный шлам.

Материал и методы исследования

Гранулирование шлаков не является сложной емкой операцией. Процесс состоит в том, что расплав шлака резко охлаждается в среде пара, воды или воздуха [8].

Доступная технология изготовления гранулированного шлака не несет сложных технологических отличий, зависящих от его вида. Поэтому подвергать грануляции можно любые шлаки. Наилучший результат приносят шлаки, богатые оксидом кальция (доменные, мартеновские), в результате резкого охлаждения шлакового расплава образуется 2-кратное увеличение объема материала, что предотвращает силикатный распад [9–11]. Состав граншлака обладает вязкими свойствами из-за стекловидной структуры, порядок химических элементов которой имеет хаотичный вид (рис. 1).

В настоящее время на заводах применяется два способа грануляции – мокрый и полусухой. Мокрый способ заключается в том, что жидкий шлак сливается непосредственно в бассейн с водой, где происходит

процесс охлаждения с последующей грануляцией. Полусухой способ осуществляют преимущественно в гидрожелобных установках. Заключающийся в том, что расплав, доставляемый шлаковозным ковшом, сливается в грануляционный желоб, где подхватывается струей воды, охлаждается и разбивается на гранулы. Образовавшийся граншлак в полном объеме поступает на участок подсушки, и затем его отгружают на склад.

Как правило, практически все способы первичной переработки шлаков сопровождаются выбросами высокотоксичных загрязняющих веществ. Это связано с химическим составом шлака, в котором сера содержится в пределах 0,01–3,50%, и способами гранулирования: обработкой шлакового расплава водой или водовоздушной смесью. В результате физико-химических превращений сера, находящаяся в расплаве переходит в газовую фазу в виде H₂S и SO₂ (табл. 2).

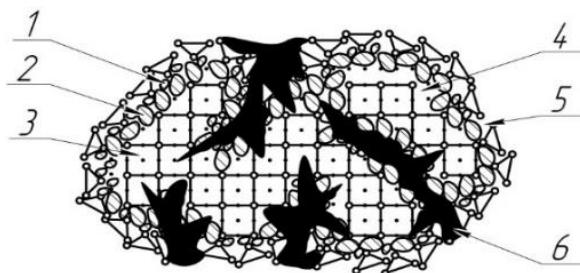


Рис. 1. Схема строения крупной гидратированной частицы шлака: 1 – отрицательно заряженные глинистые частицы в диффузионном слое; 2 – положительно заряженные частицы гидроксида алюминия в адсорбционном слое, контактирующие с поверхностью ядра; 3 – кристаллическая решетка ядра, состоящая из оксидов металлов; 4 – адсорбционный слой; 5 – диффузионный слой; 6 – пористость

Fig. 1. Scheme of the structure of a large hydrated slag particle: 1 – negatively charged clay particles in the diffusion layer; 2 – positively charged particles of aluminum hydroxide in the adsorption layer in contact with the surface of the core; 3 – the crystal lattice of the core, consisting of metal oxides; 4 – adsorption layer; 5 – diffusion layer; 6 – porosity

Таблица 1

Химический состав шлаков различного производства

Table 1

Chemical composition of slags of different production

Вид шлака	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO	FeO+ Fe ₂ O ₃	Модуль основности
доменный	39,0–42,0	32,0–40,0	6,0–9,0	7,0–10,0	7,0–11,0	0,2–0,3	3,0–7,0	1,0>
мартеновский	24,0–28,0	24,0–25,0	4,0–5,0	8,0–11,0	6,0–7,0	1,0–2,0	13,0–27,0	1,2–1,8
конвертерный	40,0–55,0	7,0–18,0	2,0–6,0	6,0–10,0	13,0–14,0	9,0–17,0	12,0–28,0	>2,0
электро-стале- плавильный	32,0–55,0	17,0–22,0	2,0–9,0	11,0–17,0	1,0–5,0	>2,0	1,0–25,0	>3,0
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaCl ₂	P ₂ O ₅	KCl	NaCl
алюминиевые шлаки	–	1,8–3,5	6,5–12,6	2,0–7,2	–	3,0–4,2	38–59	11,4–34,1
шлаки химической промышленности	44,7–50,0	34,0–45,0	1,1–3,3	0,9–4,4	–	до 2,5	–	–

В зависимости от применяемой технологии и вида получаемой продукции, сера может находиться в газовой фазе в виде соединений – сернистого ангидрида и сероводорода [12].

Таким образом, существует необходимость обезвредить парогазовые выбросы шлакоперерабатывающих предприятий с целью защиты окружающей среды и обеспечения нормальных условий труда.

Существует множество способов, подтвержденных многочисленными испытаниями, по обезвреживанию вредных веществ, содержащихся в отходящих газах шлакоперерабатывающих технологий:

– подача известкового раствора в

охлаждающую воду (разработка УралНИИ «Экология», г. Пермь);

– обработка расплава раствором с добавлением щелочи, щелочноземельных металлов, карбонатов (фирма «United States Steel», США);

– десульфурация газов в абсорберах суспензий металлургического шлака (фирмы «Мицубиси Дзюкоге», «Син-Ниппон Сэйтецу», Япония).

Наибольшее предпочтение отдается способам, которые в качестве реагента используют известь как недорогой и доступный материал [13–15].

Донецким филиалом Всероссийского научно-исследовательского и проектным



институтом «Черметэнергоочистка» разработана технология обезвреживания парогазовых выбросов непосредственно в гидрожелобе в момент выделения соединений серы путем подщелачивания оборотной воды, используемой для обработки шлака, до значения pH 12,0–12,5. Данная технология внедрена в схемах обезвреживания выбросов на шлакопемзовой установке НЛМК (Новолипецкий металлургический комбинат), Криворожсталь (Кривой Рог, Украина). Эффективность способа высока по сравнению с «традиционной» водной грануляцией, но существует необходимость ввода специальных добавок-регуляторов затвердевания шлаковых частиц, так как известно повышает гидравлическую активность гранулированного шлака и уменьшает его подвижность в установке. Применение данного способа снижает выделение серосодержащих соединений на 70–80% (концентрация H_2S составила 80 мг/м^3 , что восьмикратно превышает уровень ПДК для H_2S , который составляет 10 мг/м^3) [16, 17].

Вредные выбросы шлакоперерабатывающих предприятий рассеиваются на уровне поверхности земли, что повышает степень загрязнения на рабочих площадях и близлежащих районах. Причем, количество этих выбросов, интенсивность их выделения обуславливаются свойствами, составом шлаков и условиями их обработки. В технологии грануляции доменного шлака основным токсичным веществом является H_2S . При производстве литого щебня в соотно-

шении 1:1 образовывается сероводород и сернистый ангидрид. При производстве пемзы с применением барабанных холодильников (разработки УралНИИ «Экология», «ЛЕННИИГИПРОХИМ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), соотношение выделившегося сероводорода и сернистого ангидрида составляет 1:4 [18–20].

На промышленном комбинате «Запорожсталь» (г. Запорожье, Украина) совместно с ВАМИ (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), ДАЗ (г. Днепропетровск, Украина), НИИСМИ (г. Киев, Украина), НИИОГАЗ (г. Москва, Российская Федерация) было проведено испытание другого способа переработки шлака. Преимуществом данной технологии является применение отходов глиноземного производства – красного шлама вместо традиционно используемых материалов, содержащих известь [21].

Как известно, при переработке бокситов по способу Байера на каждую тонну глинозема получается более 1 т отхода (красного шлама), а в способе спекания – до 2,5 т. Красный шлам состоит из оксидов, %: железа (38–52), алюминия (12–15), кремния (7–12), кальция (10–14), титана (4–5), натрия (3–5), и прочих – сера, фосфор (2–8). Складывается на шламохранилищах, отвалах, чем наносит большой ущерб природе и негативно влияет на экономику предприятия из-за штрафных санкций на землепользование и загрязнение окружающей среды.

Таблица 2

**Расчетные данные удельных выбросов соединений серы
при производстве различных видов шлаковой продукции**

Table 2

**Calculated data of specific sulfur compound emissions
in the production of slags of various types**

Вид шлакового продукта	Тип установки	Удельный выброс, кг/т	
		H_2S	SO_2
Граншлак	Гидрожелобная	0,10–0,40	–
Пемза	Гидроэкранный с барабанным холодильником	3,00–4,00 0,30–0,70	1,40–3,30 0,70–2,60
Щебень	Траншеи	0,05–0,10	0,10–0,20



Ввиду высокой поглотительной способности красного шлама к соединениям серы данный материал показал хорошие результаты при применении его в процессе переработки шлака.

Нами были проведены исследования по изучению поглотительной способности добавок в составе охлаждающей жидкости в условиях грануляции. В качестве пульпы в лабораторной установке гранбассейна (рис. 2) был использован красный шлак в соотношении Т:Ж = 1:5, который подавался через дозатор 4 в емкость бассейна, залитую водой. Химический состав шлака приведен в табл. 3. Посредством устройства 10 поддерживалась однородная концентрация охлаждающей жидкости 3. Металлургический шлак 1, расплавленный в печи 2, установленной на подвижный кронштейн 11, попадал в среду охлаждающей жидкости, где происходило разрушение частиц шлака и оседание гранул 12 на сите 8.

Режим работы печи задается и поддерживается пультом управления 6. Основной поток газовой составляющей удаляется из пространства установки через газоотвод 9. Другая часть фиксируется газоанализатором 7 для установления концентрации вредных примесей в атмосфере установки. В процессе выпуска через слив 5 опытной партии охлаждающей жидкости уровень кислотности грануляционной среды составлял $pH \geq 3,0$.

Японскими специалистами разработан способ использования красного шлака при грануляции шлаков. Так как активность (К) и отпускная стоимость доменных шлаков прямо пропорциональна содержанию в них оксида алюминия, кальция и обратно пропорциональна содержанию оксида кремния [22–24]:

$$K = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1,5.$$

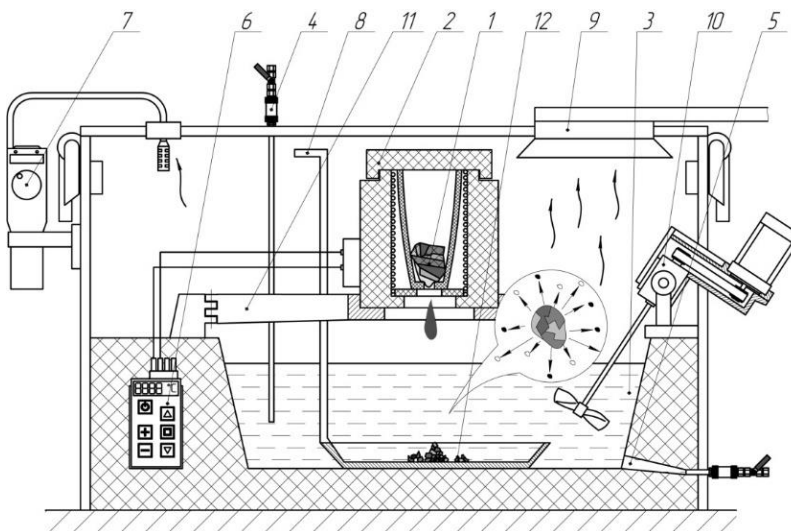


Рис. 2. Схема лабораторной установки грануляции шлака
Fig. 2. Diagram of the laboratory slag granulation plant

Таблица 3

Химический состав красного шлака

Table 3

Chemical composition of red mud

Содержание оксидов, % по массе									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	ппп
27,04	11,21	34,76	1,36	10,35	0,44	0,68	1,20	0,08	13,00



Поэтому для оптимальной работы поглощения серы соотношение красного шлама должно соответствовать следующим параметрам:

$$K = \frac{(5 \div 25\%)CaO + (7 \div 17\%)Al_2O_3}{(5 \div 10\%)SiO_2} \geq 2.$$

Результаты исследования

Была изучена поглотительная способность красного шлама в условиях грануляции. Изменение состава материала по основным компонентам приведено на рис. 3. Оно свидетельствует о том, что чем выше концентрация красного шлама в жидкой фазе, тем больше адсорбируется соединений серы на поверхности и в объеме частиц граншлака, количество которого при выпаривании уменьшается.

Кинетику сушки обоих материалов определяли на приборе «АКИП-9302» с ИК-измерителем (Российская Федерация). Полученные кривые на рис. 4 свидетельствуют о том, что скорость сушки (угол наклона ли-

нии тренда) шламошлака выше, чем у обычного граншлака.

В то же время, более пористый материал легче и быстрее размалывается, что способствует экономии на переделе размола и улучшению качества шлакопортландцемента. Действительно, как показали испытания, время помола до 8%, крупности 0,08 мм у модифицированного граншлака, по сравнению с обычным, меньше в 1,5 раза (60 минут против 95). Последний уступает и по удельной поверхности (см²/г): 3913 против 4275. Это положительно отражается на удельном количестве электроэнергии (рис. 5), а также на качестве цемента.

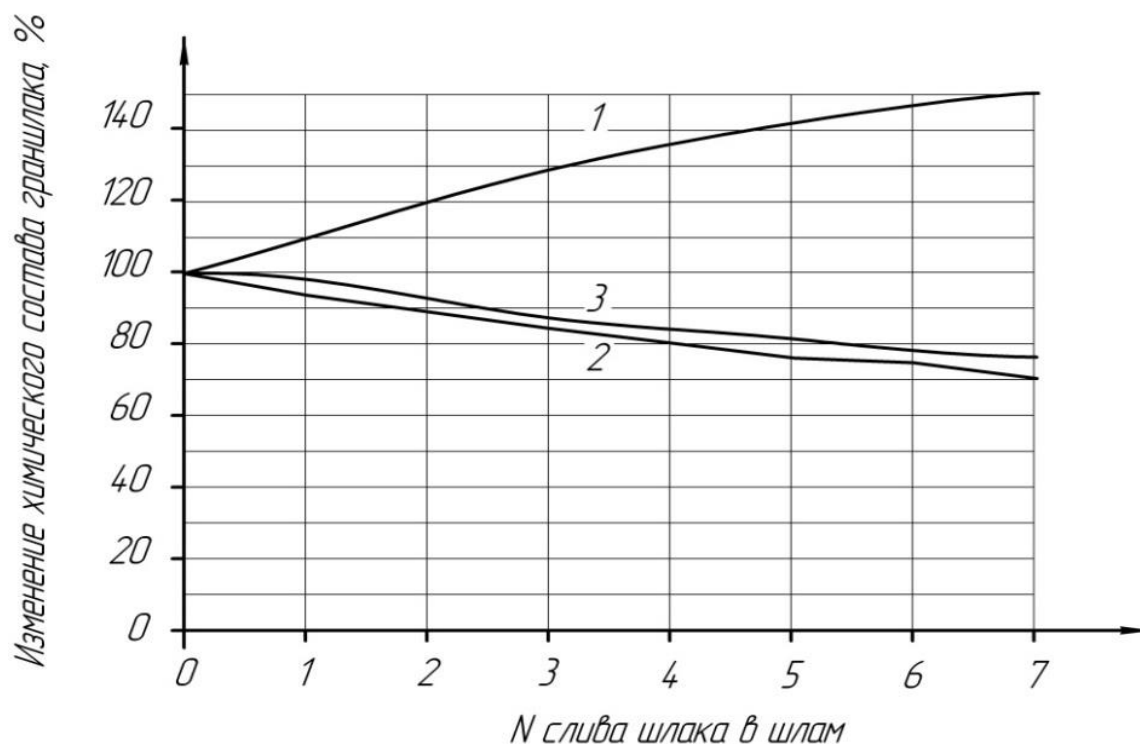


Рис. 3. Изменение химического состава граншлака оптимального количества сливов шлака в красный шлам по основным компонентам: 1 – Al₂O₃; 2 – SiO₂; 3 – CaO (за 100% принят состав обычного граншлака)

Fig. 3. Changes in the chemical composition of granulated slag of the optimal number of slag tapping in red mud by the main components: 1–Al₂O₃; 2 – SiO₂; 3 – CaO (the composition of ordinary granulated slag is taken as 100%)

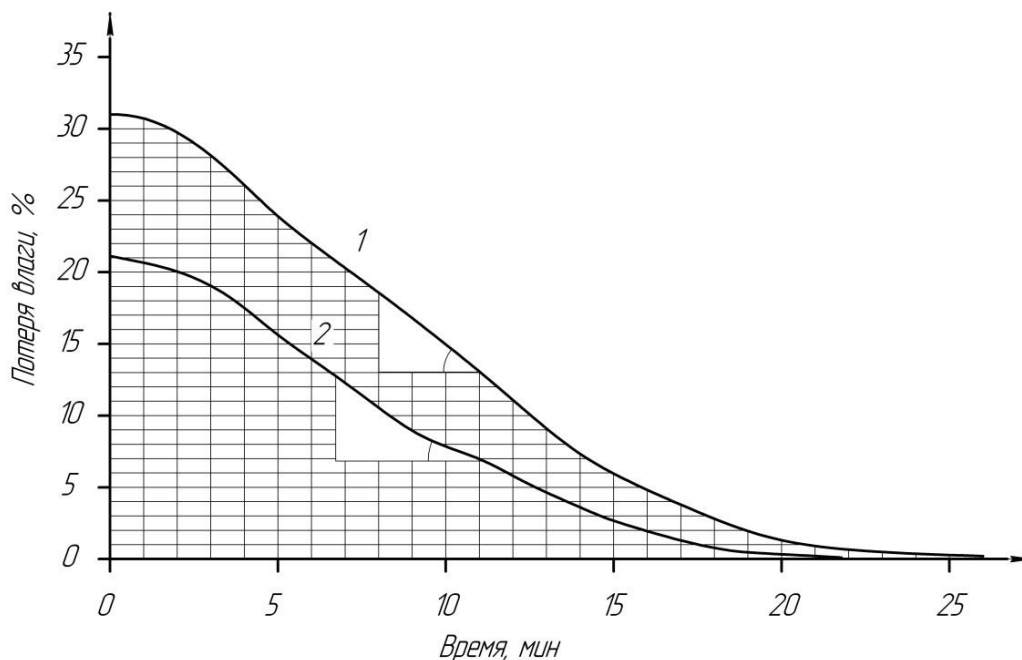


Рис. 4. Скорость потери влаги: 1 – шламошлак; 2 – граншлак
Fig. 4. Rate of moisture loss: 1 – sludge slag; 2 – granulated slag

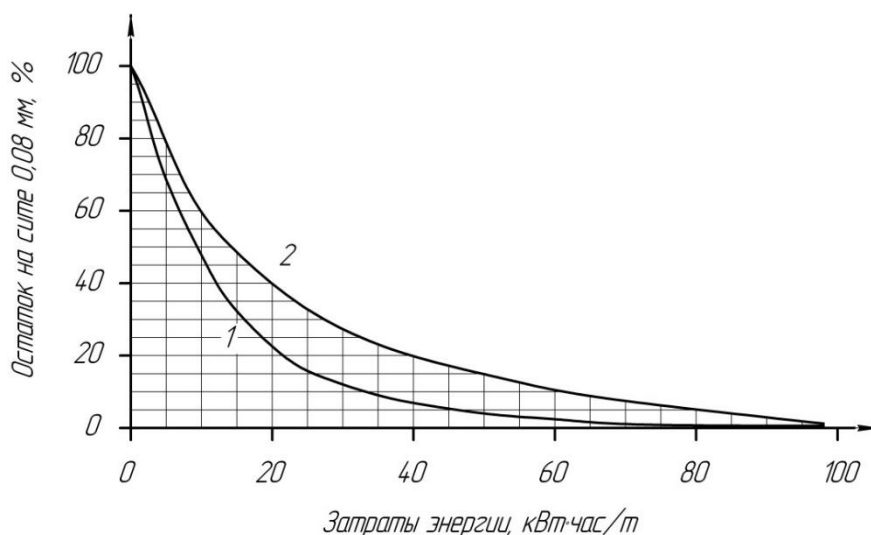


Рис. 5. Кинетика размола: 1 – шламошлак; 2 – граншлак
Fig. 5. Grinding kinetics: 1 – sludge and slag; 2 – granulated slag

Для определения концентрации примесей в воздухе атмосферы установки использовался портативный прибор «ПГА-200» (Российская Федерация). При определении концентрации H_2S в парогазовых выбросах опыт показал положительный результат. Грануляция шлакового расплава в среде охлаждающей жидкости, в составе которой пульпа красного шлама, приводит к снижению концентрации сероводорода в паровоздушных выбросах до 8–10 мг/м³, т.е. в

50–100 раз по сравнению с грануляцией в воде. При других способах грануляции содержание сероводорода в составе граншлака остается значительно выше.

Таким образом, испытания показали возможность получения в промышленных условиях гранулированного шлака, модифицированного красным шламом по технологии грануляции бассейновым способом. Результаты исследования процесса грануляции с применением добавки красного



шлама показали положительный экологический и экономический эффекты. Скорость сушки модифицированного граншлака увеличивается на 25%, по сравнению с обыч-

ным граншлаком, а усилия на размол материала снижаются на 15%. В целом это снижает время на подготовку материала для последующего применения.

Заключение

Таким образом, красный шлак может применяться в качестве поглотителя соединений серы. Концентрация сероводорода в паровоздушных выбросах снижается до 8–10 мг/м³, что соответствует уровню ПДК. Применение красного шлака в качестве модификатора при грануляции шлака имеет большое преимущество перед другими, приведенными выше, способами не только как

десульфуратора, но и как ценной составляющей при переработке шлака для производства строительных материалов – цемента, керамзита и т.д., улучшающей технические свойства продуктов. Решение проблемы утилизации отходов глиноземного производства является важной составляющей предлагаемого способа грануляции.

Библиографический список

1. Школьник Я.Ш., Шакуров А.Г., Мандель М.З. Новая технология и оборудование для переработки шлаковых расплавов // *Металлург*. 2011. № 10. С. 58–60.
2. Júnior A., Borges A., Oliveira A. Using a Multivariate Statistical in the Identification of Alumina Loss in Red Mud // *Brasil. Light Metals*, 2013. P. 87–89.
3. Зайнуллин Л.А., Сухобаевский Ю.Я., Давыдов А.А. Использование установки припечной грануляции в цветной металлургии // *Сталь*. 2000. № 3. С. 18–20.
4. Сорокин Ю.В., Демин Б.Л. Экологические и технологические аспекты переработки сталеплавильных шлаков // *ОАО «Черметинформация». Бюл. «Черная металлургия»*. 2003. № 3. С. 75–79.
5. Сенник А.И., Милуков С.В., Прошкина О.Б. Образование выбросов сероводорода при внешней грануляции доменных шлаков // *Вестник Московского государственного университета им. Г.Н. Носова*. № 3. 2008. С. 75–79.
6. Торопов Е.В., Макаров Д.П. Комплексное управление энерго- и ресурсосбережением металлургического производства // *Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф.* Екатеринбург, 2003. С. 258–261.
7. Klauber C., Gräfe M., Power G. Review of Bauxite Residue «Re-use» Options // *CSIRO*, 2009. 66 p.
8. Ли С. Т., Ким С. Х., Сон В.Е. Технология утилизации ковшового шлака // *Черные металлы*. Май, 2004. С. 28–33.
9. Зайнуллин Л.А., Бычков А.В., Чеченин Г.И., Реутов В.Н., Прокофьева Л.П. Энергосберегающая технология переработки доменных шлаков // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. Национальная металлургическая академия Украины*. Днепропетровск: НМетАУ, 2002. Т. 7. С. 166–168.
10. LaBarca I.K., Foley R.D., Cramer S.M. Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Portland Cement Concrete (PCC)-Expanded Study // *University of Wisconsin-Madison*, 2007. P. 89.
11. Lebedev A.B., Utkov V.A. Use of dumped red mud of alumina industry at granulation of the molten sulfur-containing blast furnace slag // *Periódico tchê química*. 2019. Vol. 16. № 31. P. 837–845.
12. Глинская И.В., Горбунов В.Б., Подгородецкий Г.С., Теселкина А.Э. Аналитический контроль металлургического процесса переработки красного шлака // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2013. № 9. С. 17–21.
13. Арбузов В.А., Исанова Б.Х., Белякова М.О. Очистка дымовых газов ТЭЦ от оксидов серы и азота // *Литье и металлургия*. 2009/99. № 3 (52). С. 99–103.
14. Пегова С.А., Солобоева И.С. Экологически чистое производство: подходы, оценка, рекомендации. Екатеринбург: ИРА-УТК. 2000. 392 с.
15. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. М.: Академкнига. 2002. 469 с.
16. Ладыгичев М.Г. Сырье для черной металлургии // *Экология металлургического производства*. М.: Теплоэнергетик. 2002. Т. 2. 448 с.
17. Shultz F.G., Berber J.S. Hydrogen Sulfide Removal From Hot Producer Gas With Sintered Absorbents // *Journal of the Air Pollution Control Association*. 1970. Vol. 20. № 2. P. 93–96.
18. Кузнецов Ю.М., Зайнуллин Л.А. Новый способ приготовления известняковой суспензии для систем мокрой сероочистки газов // *Сталь*. 2005. № 3. С. 118–120.
19. Мемоли Ф., Гуззон М. Рециклинг печных побочных продуктов инжекцией в электродуговую печь – опыт и перспективы // *Черные металлы*. Апрель, 2007. С. 26–33.
20. Торопов Е.В., Капкаев И.Р. Охрана воздушного бассейна при термической переработке отходов // *Охрана атмосферного воздуха. Проблемы и пути решения: сб. науч. ст. науч.- практ. конф.* (Челябинск, 2001). С. 75–76.
21. Можаренко Н.М., Параносенков А.А., Евлевский В.С. Шлакообразующая роль красных шламов // *Фун-*



даментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2004. № 9. С. 61–66.

22. Боковикова Т.Н., Некрасова А.А., Привалова Н.М. Термодинамические и кинетические характеристики процесса сорбции ионов тяжелых металлов на модифицированном неорганическом сорбенте в стоках предприятий пищевой промышленности // Известия вузов. Пищевая технология. 2012. № 5–6.

23. Советкин В.Л., Ярошенко Ю.Г., Карелов С.В., Ко-

берниченко В.Г., Ходоровская И.Ю. Природоохранные мероприятия в металлургии. Екатеринбург, 2004. 240 с.

24. Утков В.А., Петров С.И., Николаев С.А. Экономический и экологический потенциал глиноземного производства в переработке отвальных шламов // Совершенствование технологических процессов получения глинозема: сб. науч. тр. СПб: РУСАЛ ВАМИ, 2005. С. 146–154.

References

1. Schkolnik Ya.S., Shakur A.G., Mandel M.Z. New technology and equipment for processing of melted slags. *Metallurg* [Metallurgist], 2011, no. 10, pp. 58–60. (In Russian)
2. Júnior A., Borges A., Oliveira A. Using a Multivariate Statistical in the Identification of Alumina Loss in Red Mud. *Brasil. Light Metals*, 2013, pp. 87–89.
3. Zainullin L.A., Sukhobaevsky Yu.Ya., Davydov A.A. Use of the near-furnace granulation installation in non-ferrous metallurgy. *Stal'* [Steel], 2000, no. 3, pp. 18–20. (In Russian)
4. Sorokin Yu.V., Demin B.L. Environmental and technological aspects of steel slag processing. *OAO "Chermet-informatsiya". Byul. "Chernaya metallurgiya"* ["Chermet-informatsiya" JSC. Bulletin "Ferrous Metallurgy"], 2003, no. 3, pp. 75–79. (In Russian)
5. Sennik A.I., Milyukov S.V., Proshkina O.B. Formation of hydrogen sulfide emissions under external granulation of blast furnace slags. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.N. Nosova* [Bulletin of the Moscow Region State University], 2008, no. 3, pp. 75–79. (In Russian)
6. Toropov E.V., Makarov D.P. *Kompleksnoe upravlenie energo- i resursosberezeniem metallurgicheskogo proizvodstva* [Integrated management of energy and resource saving at metallurgical production]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Proceedings of the International scientific and technical conference]. Ekaterinburg, 2003, pp. 258–261. (In Russian)
7. Klauber C., Gräfe M., Power G. Review of Bauxite Residue "Re-use" Options. CSIRO, 2009, 66 p.
8. Li T. S., Choy I. S., Son V. E. Utilization technology of bucket slag. *Chernye metally* [Non-Ferrous Metals], May, 2004, pp. 28–33. (In Russian)
9. Zaynullin L.A., Bychkov A.V., Chechenin G.I., Reutov V.N., Prokof'yeva L.P. *Energosberegayushchaya tekhnologiya pererabotki domennykh shlakov* [Energy-saving technology of blast furnace slag processing]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika: sb. nauch. tr. Natsional'naya metallurgicheskaya akademiya Ukrainy. Dnepropetrovsk: NMetAU* [Metallurgical heat engineering: collection of scientific works. National Metallurgical Academy of Ukraine. Dnepropetrovsk: NMetAU], 2002, vol. 7, pp. 166–168. (In Russian)
10. LaBarca I.K., Foley R.D., Cramer S.M. Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Portland Cement Concrete (PCC)-Expanded Study. University of

Wisconsin-Madison, 2007, 89 p.

11. Lebedev A.B. et al. Use of dumped red mud of alumina industry at granulation of the molten sulfur-containing blast furnace slag. *Periódico tchê química*. 2019, vol. 16, no. 31, pp. 837–845.
12. Glinskaya I.V., Gorbunov V.B., Podgorodetskiy G.S., Teselkina A.E. Analytical control of metallurgical refining process of red mud. *Izvestiya vuzov. chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2013, no. 9, pp. 17–21. (In Russian)
13. Arbuzov B. A., Isanova B. X., Belyakova M. O. Purification of the heat electric generating station flue gases of sulfur and nitrogen oxide. *Lit'ye i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy]. 2009/99, no. 3 (52), pp. 99–103. (In Russian)
14. Pegova S. A., Soloboeva I. S. *Ekologicheskii chistoe proizvodstvo: podkhody, otsenka, rekomendatsii*. [Environmentally friendly production: approaches, evaluation, recommendations]. Ekaterinburg, 2000, 392 p. (In Russian)
15. Yusfin Yu.S., Leont'yev L.I., Chernousov P.I. *Promyshlennost' i okruzhayushchaya sreda* [Industry and Environment]. Moscow: Akademkniga Publ., 2002, 469 p. (In Russian)
16. Ladygichev M. G., Chizhikova B. M. *Syr'ye dlya chernoy metallurgii* [Raw materials for iron and steel industry]. *Ekologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Ecology of Metallurgical Production]. Moscow: Teploenergetik Publ., 2002, 448 p. (In Russian)
17. Shultz F.G., Berber J.S. Hydrogen Sulfide Removal from Hot Producer Gas with Sintered Absorbents // *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1970, vol. 20, no. 2, pp. 93–96.
18. Kuznetsov Yu.M., Zaynullin L.A. New preparation method of limestone suspension for wet scrubbing systems. *Stal'* [Steel], 2005, no. 3, pp. 118–120. (In Russian)
19. Memoli F., Guzzon M. Recycling of furnace by-products of injections into the EAF-experience and prospects. *Chernye metally* [Ferrous Metals], April, 2007, pp. 26–33. (In Russian)
20. Toropov E.V., Kapkaev I.R. *Okhrana vozduhnogo basseyna pri termicheskoy pererabotke otkhodov* [Air pollution control at thermal treatment of waste]. *Sbornik nauchnykh statej nauchno-prakticheskoy konferencii Okhrana atmosfernogo vozduha "Okhrana atmosfernogo vozdukh". Problemy i puti resheniya* [Collection of scientific articles of the scientific and practical conference: Atmospheric Air Protection. Problems and Solutions],



2001, pp. 75–76. (In Russian)

21. Mozharensko N.M., Paranosenkov A.A., Slag-forming role of red muds. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii* [Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy], 2004, no. 9, pp. 61–66. (In Russian)

22. Bokovikova T.N., Nekrasova A.A., Privalova N.M. Thermodynamic and kinetic characteristics of heavy metal ions sorption process on modified inorganic sorbent in waste waters of the food industry enterprises. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya* [News of Institutes of Higher Education. Food Technology], 2012, no. 5–6. (In Russian)

23. Sovetkin V.L., Yaroshenko Yu.G., Karelov S.V., Ko-

bernichenko V.G., Khodorovskaya I.Yu. Prirodookhrannyye meropriyatiya v metallurgii [Environmental protection measures in metallurgy]. Ekaterinburg, 2004, pp. 240. (In Russian)

24. Utkov V.A., Petrov S.I., Nikolaev S.A. *Ekonomicheskii i ekologicheskiy potentsial glinozemnogo proizvodstva v pererabotke otval'nykh shlamov* [Economic and environmental potential of alumina production in the processing of waste sludge]. *Sbornik nauchnykh trudov "Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh processov polucheniya glinozema"* [Collection of scientific articles "Improvement of technological processes of alumina production"]. Saint-Petersburg: RUSAL VAMI Publ., 2005, pp. 146–154. (In Russian)

Критерии авторства

Лебедев А.Б., Утков В.А., Бажин В.Ю. 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

Лебедев Андрей Борисович, аспирант,
e-mail: 2799957@mail.ru

Утков Владимир Афанасьевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов и производств,
e-mail: UtkovVA@yandex.ru

Бажин Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета переработки минерального сырья, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств,
e-mail: bazhin-alfail@mail.ru

Contribution

Lebedev A.B., Utkov V.A., Bazhin V.Yu. 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

Andrey B. Lebedev, Post-graduate student,
e-mail: 2799957@mail.ru

Vladimir A. Utkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automation of Technological Processes and Production, e-mail: UtkovVA@yandex.ru

Vladimir Yu. Bazhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dean of Faculty of Mineral Raw Materials Processing, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production, e-mail: bazhin-alfail@mail.ru



Исследование влияния формы рабочего пространства на МГД–параметры работы электролизера при производстве алюминия

© Н.В. Немчинова*, Е.Ю. Радионов**, В.В. Сомов***

***Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

**ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», г. Красноярск, Российская Федерация

Резюме: Цель – изучение влияния формы рабочего пространства (в частности, длины подовой настыли) электролизера на магнитогидродинамические параметры ванны при получении алюминия электролизом криолит-глиноземных расплавов. Для анализа влияния длины настыли на запас магнитогидродинамической стабильности работы электролизной ванны и максимальную плотность горизонтальных токов, возникающих в расплаве металла, использовались методы математического моделирования с помощью программ «Blums v5.07» и «MHD–Valdis». Построены модели электролизера С-8БМ, выполненные в программе «Blums v5.07», с различной длиной подовой настыли (в зависимости от срока службы электролизера). Было рассчитано 13 вариантов распределения горизонтальных токов для ванн, с длиной настыли от 30 см до 150 см с шагом в 10 см. Полученные результаты представлены в виде зависимостей запаса магнитогидродинамической стабильности и максимальной плотности горизонтальных токов от длины настыли, образующейся в электролизере в процессе эксплуатации. По результатам рассчитанных вариантов распределения горизонтальных токов было установлено, что высокие горизонтальные токи могут образовываться, как в случае уходящей под анод настыли, так и в случае небольшой, т.е. только что зарождающейся настыли; получены зависимости влияния длины настыли на запас магнитогидродинамической стабильности и величины максимальной плотности тока в расплаве металла. Определено, что для электролизеров С-8БМ вероятность возникновения магнитогидродинамической неустойчивости в период зарождения подовой настыли намного ниже (разница в значениях запаса магнитогидродинамической стабильности составляет 500 мВ), чем в тот период, когда электролизер имеет длинные, уходящие за проекцию анода настыли.

Ключевые слова: производство первичного алюминия, электролизер, срок службы электролизной ванны, форма рабочего пространства, магнитогидродинамика, математическое моделирование

Благодарности: Работа выполнена по НИР 11.7210.2017/8.9 в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ.

Информация о статье: Дата поступления 17 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 18 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Немчинова Н.В., Радионов Е.Ю., Сомов В.В. Исследование влияния формы рабочего пространства на МГД–параметры работы электролизера производства алюминия. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):169–178. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-169-178.

Studying working space form effect on electrolyzer MHD parameters at aluminum production

Nina V. Nemchinova, Eugeny Yu. Radionov, Vladimir V. Somov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

RUSAL Engineering and Technological Centre JSC, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract: The article deals with the study of the influence of the electrolysis cell working space form (in particular, the hearth accretion buildup length) on the bath magnetohydrodynamic parameters under aluminum production by the electrolysis of cryolite-alumina melts. The methods of mathematical modeling with the use of Blums v5.07 and MHD–Valdis programs were applied to analyze the effect of the accretion buildup length on the electrolysis bath magnetohydrodynamic (MHD) stability resource and the maximum density of the horizontal currents arising in the metal melt. The models of the S-8BM electrolyzer were built in the program Blums v5.07 for different hearth accretion lengths (depending on the service life of the electrolysis cell). 13 variants of horizontal current distribution were calculated for the baths with accretion buildup length from 30 cm to 150 cm with a 10 cm pitch. The obtained results are presented in the form of dependences of the MHD stability resource and maximum density of horizontal currents on the accretion buildup length formed in the electrol-



ysis cell during operation. The results of calculated variants of horizontal currents distribution have showed that high horizontal currents can be formed both in the case of accretion buildup spreading under the anode and in the case of a small just originating accretion buildup. Dependences of the MHD stability resource and maximum current density in the metal melt on the accretion buildup length were obtained. It has been determined that the probability of MHD instability occurrence in S-8BM electrolysis cells during the accretion buildup originating is much lower (the difference in the values of MHD stability resource is 500 mV) than in the period when the electrolyzer has long spreading beyond the anode projection accretion buildups.

Keywords: primary aluminum production, electrolysis cell, electrolysis bath service life, workspace form, magnetohydrodynamics (MHD), mathematical modeling

Acknowledgements: The work has been performed under the research 11.7210.2017/8.9 within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Information about the article: Received December 17, 2018; accepted for publication January 18, 2019; available online February 28, 2019..

For citation. Nemchinova N.V., Radionov E.Yu., Somov V.V. Studying working space form effect on electrolyzer MHD parameters at aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):169–178. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-169-178.

Введение

На сегодняшний день в условиях, открытых нестабильной ситуации на внешнем рынке сбыта готовой продукции, отечественная российская алюминиевая промышленность находится в поиске новых рынков сбыта алюминия. Для предприятий-потребителей, занимающихся переработкой металла, наиболее привлекательной будет та продукция из алюминия, стоимость которой будет наименьшей. Около 70% затрат, необходимых на производство 1 т алюминия, приходится на электроэнергию. Процесс электролитического получения алюминия в современных электролизерах, как правило, протекает при следующих основных технико-экономических показателях (ТЭП): выход по току 90–95%, удельный расход электроэнергии – 12–14 МВт·ч/т Al [1]. Достижению более высоких значений ТЭП препятствуют потери металла, связанные в основном с вторичными потерями алюминия: обратными реакциями взаимодействия уже выделившегося на катоде металла с растворенными в электролите анодными газами^{1,2}. На кинетику данных реакций влияют газогидродинамические и магнитогидродинамические (МГД) явления, происходящие в

ванне [2]. Причина возникновения МГД-явлений в электролизере заключается в силах Лоренца, образующихся в результате взаимодействия горизонтальных (или планарных) токов с магнитным полем от основных токоведущих элементов (в основном токов ошиновки). Взаимодействие между силами Лоренца и гравитационными волнами на границе раздела фаз «алюминий-электролит» вызывает образование межфазных волн, которые получили название МГД-нестабильностей [3]. Изменить конфигурацию ошиновки на работающей серии электролизеров практически невозможно, поскольку это требует значительных капитальных затрат и сопровождается потерями прибыли за счет простоя серии в период проведения монтажных работ. Гораздо эффективней снизить потери алюминия за счет возможного воздействия на величину горизонтальных токов в расплаве катодного металла. Согласно литературным данным³ [4], природа возникновения горизонтальных токов в металле при работе электролизера связана напрямую с формой его рабочего пространства (ФРП), которая выполняет функцию своеобразного диэлектрика (изолятора) в

¹Гринберг И.С., Зельберг Б.И., Чалых В.И., Черных А.Е. Электрометаллургия алюминия. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 427 с. / Greenberg I.S., Zelberg B.I., Chalykh, V.I., Chernykh A.E. Electrometallurgy of aluminum. Irkutsk: ISTU Publ., 2009, 427 p.

²Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Metallurgy алюминия: технология, электроснабжение, автоматизация: учеб. пособие. М.: Наука, 2008. 527 с. / Galevskiy G.V., Kulagin N.M., Mintsis M.Ya., Sirazutdinov G.A. Aluminum Metallurgy: Technology, Power Supply, Automation: Learning Aids. Moscow: Science Publ., 2008, 527 p.



токопроводящем катоде и способствует развитию горизонтальных токов в катодном металле.

Проблема выбора оптимальной ФРП при ведении процесса электролиза на ваннах любой конструкции была всегда актуальной. Создание нужной конфигурации ФРП является непростой задачей и связано с правильным выбором множества различных входных параметров управления электролизером. С одной стороны, оптимальная ФРП электролизера способствует увеличению его срока службы: стойкие труднорастворимые гарнисажи (бортовые настывы) препятствуют эрозии футеровки электролизера, а длинные или, наоборот, короткие настывы влияют на величину горизонтальных токов в электролизере, т.е. косвенным образом ухудшают основные ТЭП процесса электролиза.

Известно³, что ФРП любого электролизера условно можно разбить на гарнисаж (или бортовую настыв), подовую настыв, а также временные осадки или в некоторых случаях труднорастворимые коржи. В работе [4] автор акцентирует внимание на том, что длина подовой настывы l связана со

сложными физико-химическими процессами, проходящими в электролизере на протяжении всего срока его службы. По мнению этого же исследователя, электролизеры с большим сроком службы, как правило, имеют длинную подовую настыв и наличие большого количества осадков (либо коржей). В свою же очередь на вновь пущенных электролизерах ФРП (в большинстве случаев) только начинает формироваться: практически отсутствуют подовая настыв и незначительный (нарастающий) гарнисаж.

В работах [5–10] говорится о том, что одна из основных причин, влияющих на образование горизонтальных токов в электролизере, связана с длиной подовой настывы. В своих исследованиях⁴ автор делает вывод о том, что одна из основных причин, влияющих на МГД-характеристики электролизера, заключается именно в величине плотности горизонтальных токов.

Авторами данной статьи на примере расчета математических моделей электролизера с анодом Содерберга были проведены исследования по влиянию длины настывы на образование горизонтальных токов в металле и изменение запаса МГД-стабильности.

Математическое моделирование магнитогидродинамических процессов в электролизерах получения первичного алюминия

В настоящее время для математического моделирования МГД-характеристик электролизеров используются специализированные программы, применение того или иного программного продукта связано со спецификой и сложностью решаемых задач [11]. Так, достоинствами программы «Blums v5.07» (разработчик – А.В. Калимов, ООО «Полифем», г. Санкт-Петербург, Россия) являются адекватность расчета магнитного

поля, проверенная результатами натурных измерений, визуализация модели в онлайн-режиме и, как следствие, простота и комфортность в работе, оснащение дополнительным модулем, позволяющим строить карты МГД-стабильности. Программа «ArcRUSAL» (авторы – П.Н. Вабишев и А.В. Калимов, ООО «Полифем», г. Санкт-Петербург, Россия) имеет отличие в настройках и более удобный интерфейс в

³Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. Электрометаллургия алюминия и магния: учебник для вузов. М.: Metallurgy. 1987. 320 с. / Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkolnikov S.N. Electrometallurgy of aluminum and magnesium: textbook for universities. M.: Metallurg Publ., 1987, 320 p.

⁴Скворцов А.П. Усовершенствование технологии электролиза алюминиевых мощных электролизеров с обожженными анодами с целью повышения МГД-устойчивости: дисс. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1986. 142 с. / Skvortsov A.P. Improving reduction technology of aluminum powerful electrolysis cells with baked anodes to improve MHD stability: Candidate's Dissertation in technical sciences. Leningrad, 1986, 142 p.



сравнении с «Blums v5.07». Программный комплекс «MHD-Valdis» (разработчик – В. Бояревич, Университет Гринвича, Великобритания) позволяет рассчитывать скорости циркуляции и перекося поверхности металла, а также выполняет Фурье-преобразование и анализирует тип МГД-нестабильности. Достоверность результатов программы «Blums v5.07» была проверена неоднократно на практике. В ОК «РУСАЛ» в данной программе выполнялись расчеты большинства высокоамперных электролизеров, таких как ОА-300, РА-300, РА-400, РА-500. Программа «MHD-Valdis» [12–14] является международным программным продуктом, получившим распространение на алюминиевых заводах различных стран: Дубай, Норвегия, КНР. В рамках пользовательской поддержки

программа «MHD-Valdis» постоянно совершенствуется, объединяя пожелания (рекомендации) исследователей со всего мира.

С целью выявления зависимости влияния ФРП на величину горизонтальных токов и, как следствие, на МГД-характеристики электролизера нами были выполнены расчеты запаса МГД-стабильности при различной длине подовой настыли. Запас МГД-стабильности – это разница между рабочим напряжением электролизера в обычном технологическом режиме и напряжением при возникновении МГД-нестабильности (состояние электролизера, при котором изменение во времени рабочего напряжения можно характеризовать как гармоническое с амплитудой колебаний $\sim 50 \div 100$ мВ и частотой $\sim 0,3 \div 0,6$ Гц).

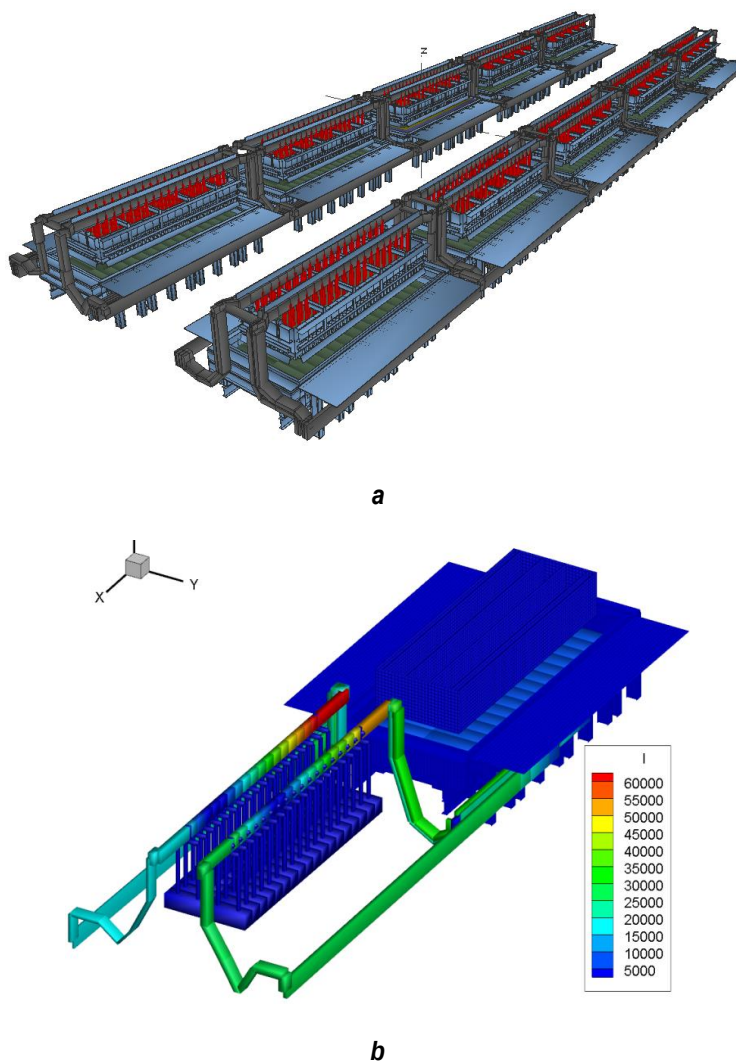


Рис. 1. Модель электролизера С-8БМ, построенная в программах: а – «Blums v5.07», б – «MHD-Valdis»
Fig. 1. Model of S-8BM electrolytic cell built in the programs: а – Blums v5.07, б – MHD-Valdis



Математическое моделирование выполнялось в двух разных программах: «Blums v5.07» и «MHD-Valdis». Каждая из этих программ имеет свои преимущества и недостатки в сравнении друг с другом. Расчет в обеих программах основывается на принципе «мелкой воды», т.е. происходит на уровне границ фаз «металл-электролит».

Для расчета авторами статьи был выбран один из самых распространенных типов электролизеров отечественной алюминиевой промышленности с анодом Содерберга – С-8БМ. Данными ваннами укомплектованы такие заводы ОК «РУСАЛ» как: АО «РУСАЛ Красноярск» (Красноярский алюминиевый завод), ПАО «РУСАЛ Братск»

(Братский алюминиевый завод), филиал ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов (Иркутский алюминиевый завод), АО «РУСАЛ Новокузнецк» (Новокузнецкий алюминиевый завод) и АО «РУСАЛ Волгоград» (Волгоградский алюминиевый завод). Исследование специфики работы С-8БМ занималось огромное количество специалистов, и на сегодняшний день можно полагать, что конструкция данных агрегатов наиболее изучена. На рис. 1 и 2 представлена математическая модель электролизера типа С-8БМ ОАО «РУСАЛ Красноярск» [11, 15, 16], построенная с помощью программ «Blums v5.07» и «MHD-Valdis», соответственно.

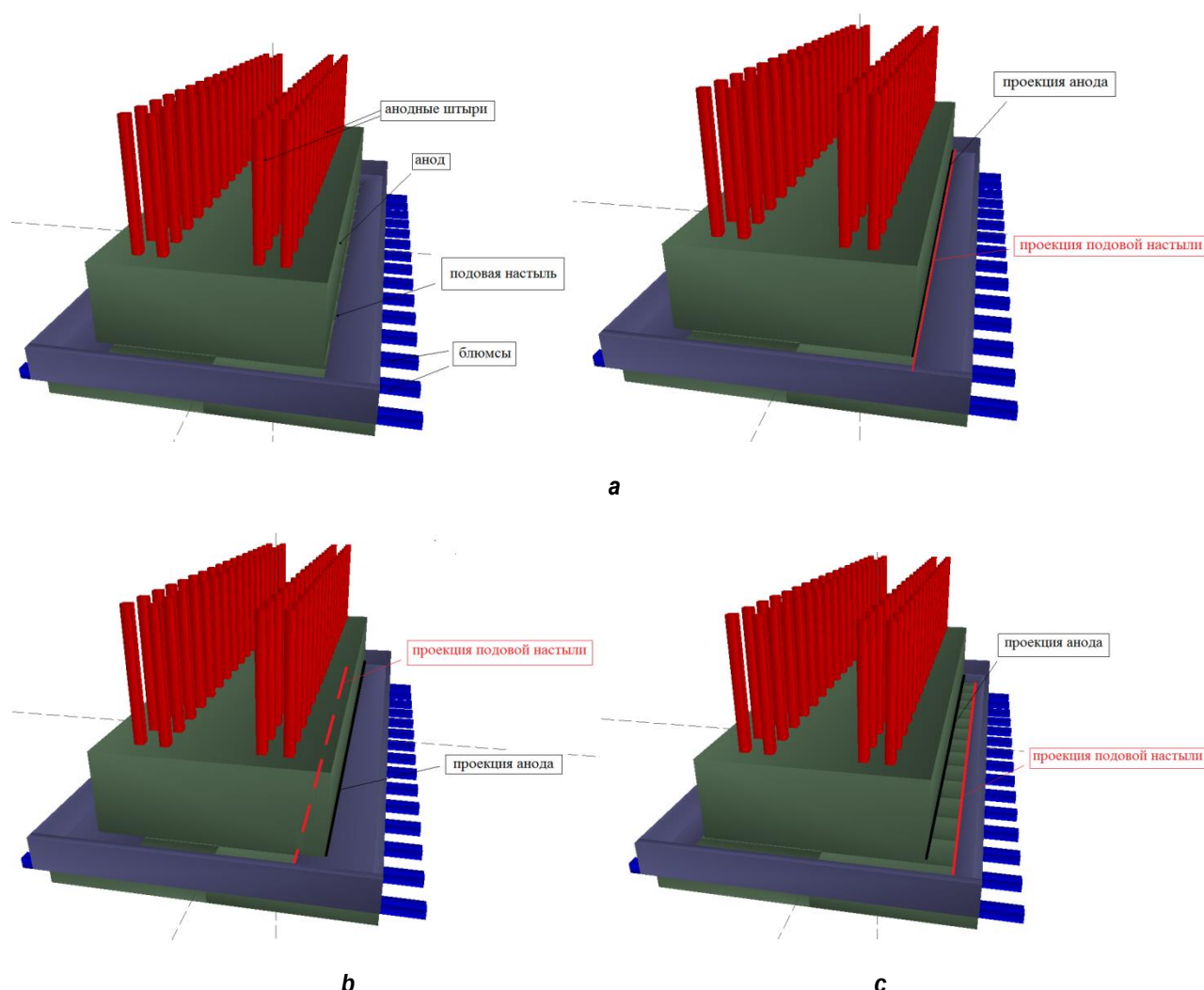


Рис. 2. Тип подовой настыли: а – подовая настыль в проекцию анода; б – подовая настыль за проекцией анода (длинная настыль); с – короткая (зарождающаяся) подовая настыль
Fig. 2. Type of a hearth accretion buildup: a – hearth accretion buildup in the anode projection, b – hearth accretion buildup beyond the anode projection (long accretion buildup), c – short (originating) hearth accretion buildup



Обсуждение результатов моделирования

В моделях длина настыли задавалась от минимального значения, которое, как правило, характерно для настыли пусковых электролизеров, до максимального для настыли, присутствующей на ваннах, близ-

ких по сроку службы к отключению (~ 60 месяцев). На рис. 2 представлены модели электролизера С-8БМ, выполненные в программе «Blums v5.07» с различной длиной подовой настыли.

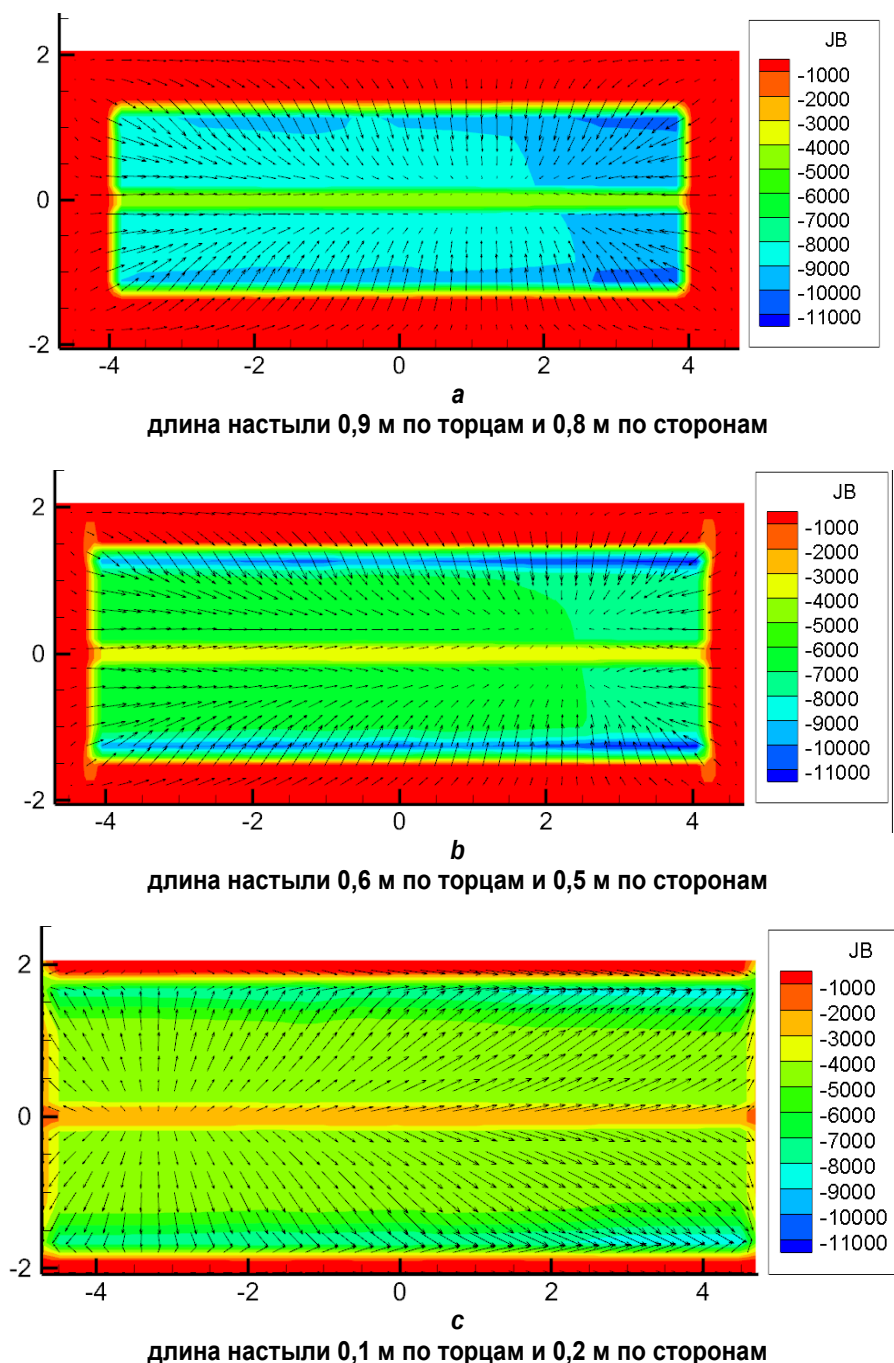


Рис. 3. Результаты расчета распределения плотностей горизонтальных токов в расплаве катодного металла, выполненных в программе «MHD-Valdis»: а – уходящая настыль за проекцию анода; б – настыль в проекции анода; с – формирующаяся настыль

Fig. 3. Calculation results of horizontal current density distribution in cathode metal melt: а – accretion buildup beyond the anode projection; б – accretion buildup in the anode projection; с – forming accretion buildup



Расчеты, выполненные в программе «MHD-Valdis» показывают, что высокие горизонтальные токи могут образовываться как в случае уходящей под анод настыли, так и в случае небольшой, т.е. только что зарождающейся настыли. В первом случае вектора плотности тока будут направлены от периферии в сторону центра электролизера; во втором (при отсутствии настыли) – в противоположную, т.е. от центра к периферии. Если же настыль находится в проекции анода, то плотность горизонтальных токов снижается. Рассмотрим рис. 3.

В программе «Blums v5.07» было рассчитано 13 вариантов распределения горизонтальных токов для ванн с длиной настыли от 30 см до 150 см и с шагом в 10 см. Полученные результаты представлены в виде зависимостей запаса МГД-стабильности (U МГД-запас) от длины настыли (рис. 4)

и максимальной плотности горизонтальных токов ($i_{\max}$) от длины настыли (рис. 5).

По результатам расчетов, выполненных в программе «Blums v5.07», можно сделать вывод о том, что увеличение длины подовой настыли на ваннах С-8БМ способствует снижению запаса МГД-стабильности (см. рис. 4).

В свою очередь образование $i_{\max}$ характерно как при уходящей за проекцию анода настыли, так и при зарождающейся подовой настыли (т.е. не доходящей до проекции анода) (см. рис. 5). Следовательно, для электролизеров С-8БМ вероятность возникновения МГД-нестабильности в период зарождения подовой настыли (т.е. пусковой и послепусковой периоды) намного ниже (разница в значениях запаса МГД-стабильности составляет 500 мВ), чем в тот период, когда электролизер имеет длинные, уходящие за проекцию анода настыли.

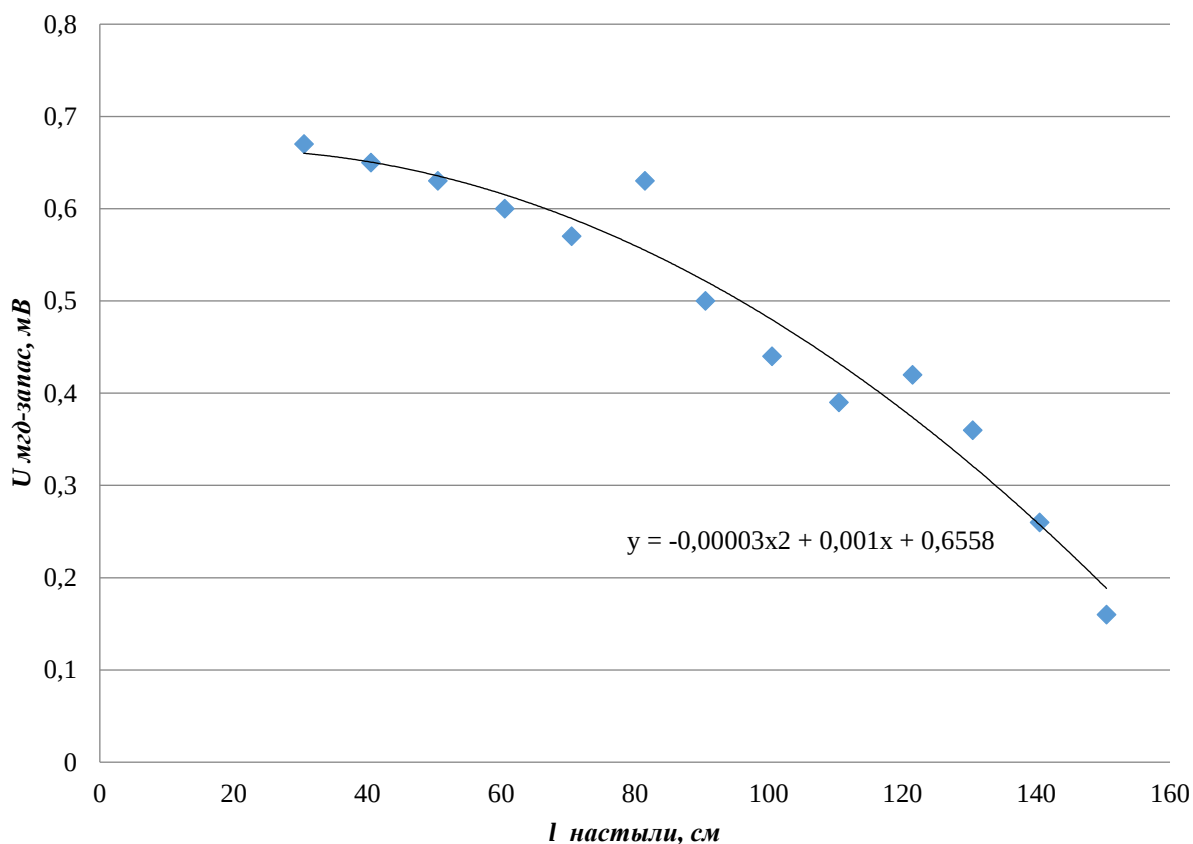


Рис. 4. Зависимость запаса МГД-стабильности электролизера от длины подовой настыли
Fig. 4. Graphical dependence between the electrolytic cell MHD stability resource and the hearth accretion buildup length

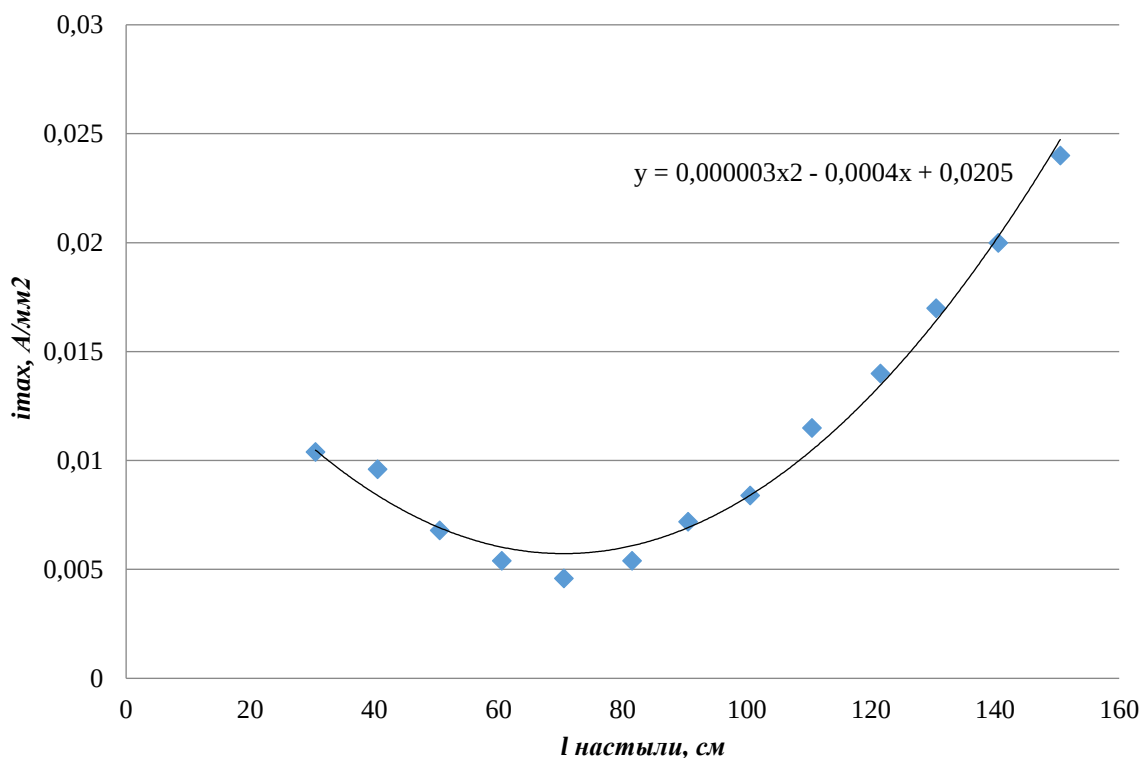


Рис. 5. Зависимость максимальной плотности горизонтальных токов в катодном металле от длины подовой настыли
Fig. 5. Graphical dependence between the maximum density of cathode metal horizontal currents on the hearth accretion buildup length

Заключение

Форма рабочего пространства (гарнисаж, подовая настыль, временные осадки) в электролизной ванне зависит от срока службы. Оптимальная ФРП электролизера способствует увеличению его срока службы: стойкие труднорастворимые гарнисажи (бортовые настыли) препятствуют эрозии футеровки электролизера, а длинные или, наоборот, короткие настыли влияют на величину горизонтальных токов в электролизере, т.е. косвенным образом ухудшают основные технико-экономические показатели процесса электролиза.

На примере расчета математических моделей электролизера с анодом Содерберга типа С-8БМ, построенные с помощью программы «Blums v5.07», были проведены исследования по влиянию длины настыли на образование горизонтальных (планарных) токов в металле и изменение запаса

МГД-стабильности. Было рассчитано 13 вариантов распределения горизонтальных токов для ванн с длиной настыли от 30 см до 150 см с шагом в 10 см., в результате чего были получены уравнения регрессии.

Установлено, что высокие горизонтальные токи могут образовываться как в случае уходящей под анод настыли, так и в случае небольшой, т.е. только что зарождающейся настыли. По результатам расчета получены зависимости влияния длины настыли на запас МГД-стабильности и величины максимальной плотности тока в расплаве металла. Также было определено, что для электролизеров С-8БМ вероятность возникновения МГД-нестабильности в период зарождения подовой настыли намного ниже (разница в значениях запаса МГД-стабильности составляет 500 мВ), чем в тот период, когда электролизер имеет длинные, уходящие за проекцию анода настыли.



Библиографический список

1. Mann V., Buzunov V., Pitercev N., Chesnyak V., Polykov P. Reduction in Power Consumption at UC Rusal's Smelters 2012–2014 // *Light Metals*. 2015. P. 757–762.
2. Бегунов А.И. Газогидродинамика и потери металла в алюминиевых электролизерах. Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1992. 286 с.
3. Kdkhodabeigi M., Saboohi Y. A New Wave Equation for MHD Instabilities in Aluminum Reduction Cells // *Light Metals*. 2007. P. 345–349.
4. Sørli M., Øye H. Cathodes in Aluminium Electrolysis (3rd edition). Dusseldorf: Aluminium-Verlag. 2010. 662 p.
5. Urata N. Magnetics and Metal Pad Instability // *Light Metals*. 1985. P. 581–589.
6. Segatz M., Droste C. Analysis of Magnetohydrodynamic Instabilities in Aluminium Reduction Cells // *Light Metals*. 1994. P. 313–322.
7. Davidson P.A., Lindsay R.I. A New Model Of Interfacial Waves in Aluminium Reduction Cells // *Light Metals*. 1997. P. 437–444.
8. Droste C., Segatz M., Vogelsang D. Magnetohydrodynamic Instability Analysis in Reduction Cells // *Light Metals*. 1998. P. 419–427.
9. Davidson P.A., Lindsay R.I. Stability of interfacial waves in aluminum reduction cells // *J. of Fluid Mechanics*, 362. 1998. P. 273–295.
10. Panaitescu A., Moraru A. Research on the Instabilities in the Aluminum Electrolysis Cell // *Light Metals*. 2003. P. 359–366.
11. Радионов Е.Ю., Немчинова Н.В., Третьяков Я.А.

- Моделирование магнитогазодинамических процессов в электролизерах при получении первичного алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 7 (102). С. 112–120.
12. Bojarevics V. Practical modelling of MHD stability in aluminium reduction cells // *Цветные металлы и минералы-2016: сборник тезисов докладов Восьмого междуна. конгресса: сборник тезисов докладов Восьмого междуна. конгресса (г. Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.)*. Красноярск, 2016. С. 61.
 13. Bojarevics V. MHD of Aluminium Cells with the Effect of Channels and Cathode Perturbation Elements // *Light Metals*. 2013. P. 609–614.
 14. Shaoyong R., Feiya Y., Dupuis M., Bojarevics V., Jianfei Z. Production Application Study on Magneto-hydro-dynamic Stability of a Large Prebaked Anode Aluminium Reduction Cell // *Light Metals*, 2013. P. 603–607.
 15. Пингин В.В., Третьяков Я.А., Радионов Е.Ю., Губин А.А. Исследование влияния положения анодной рамы на запас МГД-стабильности электролизера С-8БМЭ // *Цветные металлы-2012: сборник научных статей (г. Красноярск, 5–7 сентября 2012 г.)*. Красноярск, 2012. С. 431–434.
 16. Пат. № 2517623, РФ, МПК С25С 3/12 Способ обслуживания алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / В.В. Пингин, Я.А. Третьяков, А.А. Губин, Е.Ю. Радионов; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». № 2012158363, заявл. 29.12.2012, опубл. 27.05.2014.

Reference

1. Mann V., Buzunov V., Pitercev N., Chesnyak V., Polykov P. Reduction in Power Consumption at UC Rusal's Smelters 2012–2014. *Light Metals*, 2015, pp. 757–762.
2. Begunov A.I. *Gazogidrodinamika i poteri metalla v aluminievyykh elektrolizeraх* [Gasohydrodynamics and metal losses in aluminium electrolytic cells]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 1992, 286 p. (In Russian)
3. Kdkhodabeigi M., Saboohi Y. A New Wave Equation for MHD Instabilities in Aluminum Reduction Cells. *Light Metals*, 2007, pp. 345–349.
4. Sørli M., Øye H. Cathodes in Aluminium Electrolysis (3rd edition). Dusseldorf: Aluminium-Verlag, 2010, 662 p.
5. Urata N. Magnetics and Metal Pad Instability. *Light Metals*, 1985, pp. 581–589.
6. Segatz M., Droste C. Analysis of Magnetohydrodynamic Instabilities in Aluminium Reduction Cells. *Light Metals*, 1994, pp. 313–322.
7. Davidson P.A., Lindsay R.I. A New Model of Interfacial Waves in Aluminium Reduction Cells. *Light Metals*, 1997, pp. 437–444.
8. Droste C., Segatz M., Vogelsang D. Magnetohydrody-

- namics Instability Analysis in Reduction Cells. *Light Metals*, 1998, pp. 419–427.
9. Davidson P.A., Lindsay R.I. Stability of interfacial waves in aluminum reduction cells. *J. of Fluid Mechanics*, 362, 1998, pp. 273–295.
 10. Panaitescu A., Moraru A. Research on the Instabilities in the Aluminum Electrolysis Cell. *Light Metals*, 2003, pp. 359–366.
 11. Radionov E.Yu., Nemchinova N.V., Tretiakov Ya.A. Magnetohydrodynamic processes modeling in electrolyzers at primary aluminum production *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 7 (102), pp. 112–120. (In Russian)
 12. Bojarevics V. Practical modelling of MHD stability in aluminium reduction cells. *Non-Ferrous Metals & Minerals – 2016: Book of Abstracts of the Eighth International Congress (Krasnoyarsk, 13–16 September 2016)*. Krasnoyarsk, 2016, 61 p. (In Russian)
 13. Bojarevics V. MHD of Aluminium Cells with the Effect of Channels and Cathode Perturbation Elements. *Light Metals*. 2013, pp. 609–614.
 14. Shaoyong R., Feiya Y., Dupuis M., Bojarevics V.,



Jianfei Z. Production Application Study on Magneto-hydro-dynamic Stability of a Large Prebaked Anode Aluminum Reduction Cell. *Light Metals*, 2013, pp. 603–607.

15. Pingin V.V., Tretiakov Y.A., Radionov E.Yu, Gubin A.A. *Issledovanie vliyaniya polozheniya anodnoj ramy na zapas MGD-stabil'nosti elektrolizera S-8BME* [Study of the influence of the anode frame position on the stock of MHD-stability of S-8BME electrolyzer]. *Cvetnye metally-2012: sbornik nauchnyh statej* [Non-Ferrous Metals –

2012: Collection of Scientific Articles, Krasnoyarsk, 5–7 September 2012]. Krasnoyarsk, 2012, pp. 431–434. (In Russian)

16. Pingin V.V., Tretiakov Y.A., Gubin A.A., Radionov E.Yu. *Sposob obsluzhivaniya alyuminievogo elektrolizera s samoobgigayuhcimsia anodom* [Service method of aluminum electrolytic cell with self-baking anode]. Patent RF, no. 2517623, 2014.

Критерии авторства

Немчинова Н.В., Радионов Е.Ю., Сомов В.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nemchinova N.V., Radionov E.Yu., Somov V.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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Немчинова Нина Владимировна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов, e-mail: ninavn@yandex.ru

Радионов Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, руководитель проекта Департамента новых технологий Инженерно-технологической дирекции Алюминиевого производства, e-mail: Evgeniy.Radionov@rusal.com

Сомов Владимир Владимирович, аспирант, менеджер отдела природоохранных технологий Департамента новых технологий Инженерно-технологической дирекции Алюминиевого производства, e-mail: comob-boba@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nina V. Nemchinova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: ninavn@yandex.ru

Eugeniy Yu. Radionov, Cand. Sci. (Eng.), Project Manager of the New Technologies Department of the Engineering and Technological Directorate of Aluminum Production, e-mail: Evgeniy.Radionov@rusal.com

Vladimir V. Somov, Postgraduate, Manager of Environmental Protection Technologies Division of the New Technologies Department of the Engineering and Technological Directorate of Aluminum Production, e-mail: comob-boba@yandex.ru



Технология извлечения золота и серебра из упорного золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон» (Республика Таджикистан)

© О.Б. Рахманов, А.В. Аксёнов, Г.Г. Минеев, Х.Ё. Давлатов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель – изучение возможности переработки упорного золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон» (Республика Таджикистан) с использованием арсенатирующего обжига. При исследовании химического состава исходных проб и продуктов переработки использовались оптико-эмиссионный, атомно-абсорбционный, рентгенофазовый, гравиметрический, титриметрический, фотометрический метод анализа, а также метод ИК-спектроскопии. Содержание золота и серебра определяли пробирным атомно-абсорбционным анализом. Извлечение драгоценных металлов из флотоконцентрата и полученного огарка проводилось методом сорбционного цианирования в агитационном режиме. Полученные результаты по цианированию показали, что исходный флотоконцентрат является упорным к цианистому процессу: сорбционным цианированием извлекается 55,1% золота и 75,8% серебра. Извлечение золота и серебра при цианировании огарка, полученных в результате окислительно-арсенатирующего обжига в оптимальных условиях, составило 68,3% и 49,1%, соответственно. Исследования показали, что извлечение золота после переработки золотомышьяковистых флотоконцентратов, по технологии «арсенатирующий обжиг – цианирование», выросло на 13,2% по сравнению с применением цианирования исходного флотоконцентрата. Предложены направления дальнейших технологических исследований для изыскания рациональных способов переработки упорного золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон».

Ключевые слова: месторождение «Иккижелон», химический состав, мышьяковистый флотоконцентрат, сорбционное цианирование, арсенатирующий обжиг, извлечение золота и серебра

Информация о статье: Дата поступления 14 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 16 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Формат цитирования: Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Минеев Г.Г., Давлатов Х.Ё. Технология извлечения золота и серебра из упорного золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон» (Республика Таджикистан). *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):179–186. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-179-186.

Technology of gold and silver extraction from refractory gold-arsenic flotation concentrate of Ikkijelon deposit (Republic of Tajikistan)

Odilzhon B. Rakhmanov, Aleksandr V. Aksenov, Gennady G. Mineev, Khisrav E. Davlatov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The paper studies the possibility of processing refractory gold-arsenic flotation concentrate from Ikkijelon deposit (Republic of Tajikistan) by arsenatizing roasting. The chemical composition of initial samples and derivative products are studied using the methods of optical emission, atomic absorption, IR-spectroscopy, X-ray phase, gravimetric, titrimetric and photometric analysis methods. The content of gold and silver were determined by a fire assay atomic absorption analysis. Precious metals were extracted from the flotation concentrate and the resulting calcine by sorption cyanidation in an agitation mode. The obtained cyanidation results have showed that the initial flotation concentrate is resistant to cyanidation: only 55.1% of gold and 75.8% of silver are extracted by sorption cyanidation. Under calcine cyanidation the content of extracted gold and silver by the method of oxidation arsenatizing roasting reaches 68.3% and 49.1% respectively in optimal conditions. The studies have shown that gold recovery after the processing of gold-arsenic flotation concentrates by the technology of “arsenatizing roasting – cyanidation” has increased by 13.2% compared to the cyanidation of the initial flotation concentrate. The directions of further technological studies aimed at searching for rational methods for processing of refractory gold-arsenic flotation concentrate from Ikkijelon deposit are proposed.

Keywords: Ikkijelon deposit, chemical composition, arsenic flotation concentrate, sorption cyanidation, arsenatizing roasting, gold and silver recovery

Information about the article: Received December 14, 2018; accepted for publication January 16, 2019; available online February 28, 2019.



For citation: Rakhmanov O.B., Aksenov A.V., Mineev G.G., Davlatov Kh.E. Technology of gold and silver extraction from refractory gold-arsenic flotation concentrate of Ikkijelon deposit (Republic of Tajikistan). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):179–186. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-179-186.

Введение

Наиболее распространенной причиной технологической упорности золотосодержащих руд и концентратов является тонкая вкрапленность золота, тесно ассоциированного с плотными и нерастворимыми в NaCN минералами. Такими минералами чаще всего являются сульфиды железа и мышьяка: пирит и арсенопирит [1–3].

К числу известных способов вскрытия сульфидных минералов, увеличивающих степень доступности выщелачивающего раствора к вкрапленному тонкодисперсному золоту, относятся тонкий и сверхтонкий помол, автоклавное и атмосферное окисление, бактериальное окисление, а также обжиг [1, 4–6].

Известные способы обжига, например, окислительный, окислительно-хлорирующий, окислительно-сульфидирующий

или арсенатирующий, представляют собой термохимическое вскрытие руды или концентрата при температуре, не превышающей температуру плавления золота и других компонентов концентрата¹ [3, 7–9].

Обжигowo-цианистая технология переработки пиритных и арсенопиритных золотосодержащих материалов постоянно совершенствуется (включая решение экологических проблем).

В настоящей работе приведены сведения о химическом составе золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон» (Республика Таджикистан). Также представлены результаты исследований по переработке мышьяковистого флотоконцентрата с использованием традиционной технологии цианирования и предлагаемой технологии «арсенатирующий обжиг – цианирование».

Методы исследования

С целью извлечения драгоценных металлов из упорных золотосодержащих мышьяковистых концентратов в лабораторных условиях получен флотоконцентрат из руды месторождения «Иккижелон».

Химический состав исходного сырья (флотоконцентрата) и продукта, полученного после переработки (огарка), определяли с применением различных методов анализов: оптико-эмиссионного спектрометрического с индуктивно-связанной плазмой, атомно-абсорбционного, ИК-спектроскопического, гравиметрического, титриметрического и фотометрического.

На рис. 1 представлен химический

состав исследуемого флотационного концентрата.

Для исследуемого образца флотоконцентрата характерно повышенное содержание мышьяка – 12,9%, что негативно может влиять на дальнейшую гидрометаллургическую переработку. Ценными компонентами в флотоконцентрате являются золото и серебро, содержание которых по результатам прямого пробирного анализа составляет 39,1 г/т и 318,0 г/т, соответственно [10–12].

Сорбционное цианирование исследуемого флотоконцентрата и огарка, полученного в результате обжига, проводилось в агитационном режиме.

¹Минеев Г.Г., Минеева Т.С., Жучков И.А., Зелинская Е.В. Теория металлургических процессов: учебник для вузов. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2010. 524 с. / Mineev G.G., Mineeva T.S., Zhuchkov I.A., Zelinskaya E.V. Theory of metallurgical processes: textbook for higher schools. Irkutsk, ISTU Publ., 2010, 524 p.

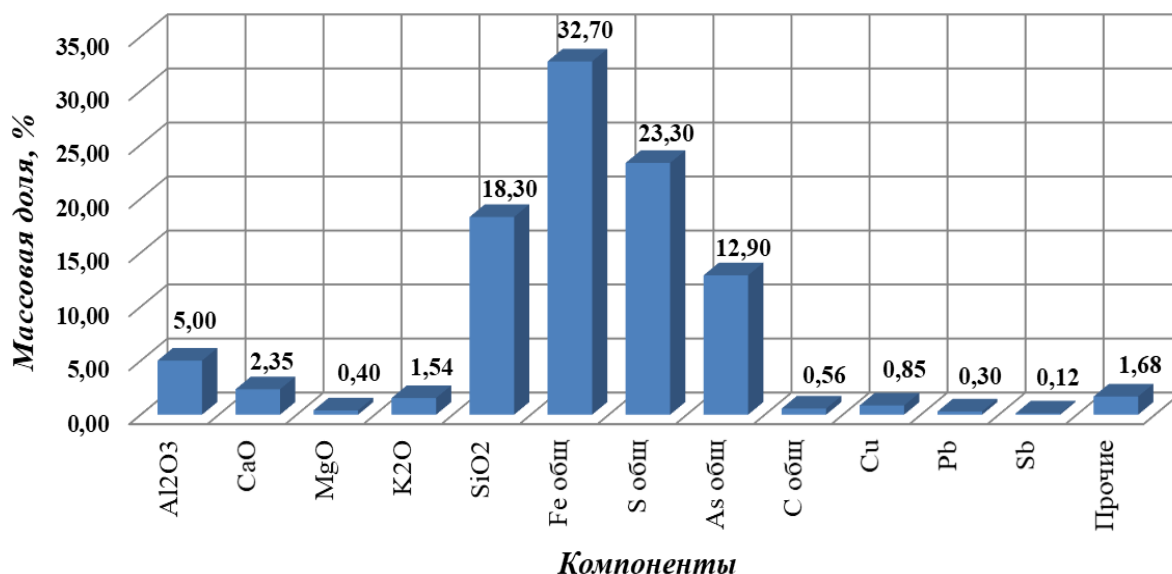


Рис. 1. Химический состав флотоконцентрата
Fig. 1. Chemical composition of the flotation concentrate

Результаты и их обсуждение

Проведены исследования по цианированию флотоконцентрата исходной крупности с содержанием класса – 71 мкм 95%. Флотоконцентрат подвергали цианированию в сорбционном режиме при загрузке активного угля 10% от объема жидкой фазы. Продолжительность выщелачивания составляла 24 ч. Известь в тестах добавляли в виде порошка, а цианид – в виде крепкого раствора в количестве, полученном согласно следующим формулам:

$$q = 400 \cdot (0,02 - C_2) / C_{изв} \quad (1)$$

$$V = 400 \cdot (0,2 - C_2) / C_p \quad (2)$$

где q – масса извести для подкрепления, г; V – объем крепкого раствора цианида для подкрепления, мл; C_2 – концентрация цианида или извести по результату опробования, %; $C_{изв}$ – содержание (активность) оксида кальция в извести, %; C_p – концентрация цианида в крепком растворе, %.

Результаты тестов по цианированию представлены в табл. 1.

Из результатов исследования следует, что исходный флотоконцентрат является упорным продуктом по отношению к цианистому процессу. Таким образом, циани-

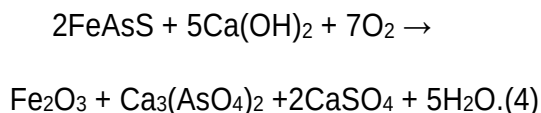
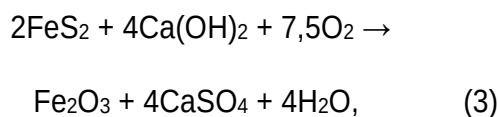
рование исследуемого флотоконцентрата без специальной предварительной обработки характеризуется низкими показателями: степень извлечения золота составляет 55,1%, а серебра – 75,8%.

Одним из эффективных и недорогих способов вскрытия золота, находящегося в тонкодисперсном состоянии или в тесной ассоциации с пиритом и арсенопиритом, является арсенатизирующий обжиг. В отличие от окислительного и окислительно-хлорирующего обжига золотосодержащих концентратов арсенатизирующий обжиг предполагает сохранение основной массы мышьяка и серы в огарке, что рассматривается как существенное преимущество процесса, поскольку при этом исключается насыщение обжиговых газов токсичными компонентами [3, 13, 14].

Проведены исследования по технологии «арсенатизирующий обжиг флотоконцентрата – цианирование огарка» на продукте исходной крупности. По данному варианту образцы пиритного и арсенопиритного флотоконцентратов смешивают с гашеной известью ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) и нагревают до температуры 650–750°C. Именно при такой температуре происходит термическая диссоциация пирита и арсенопирита. Физико-химическое



взаимодействие пирита и арсенопирита с кислородом воздуха и гашеной известью протекает по реакциям (3) и (4):

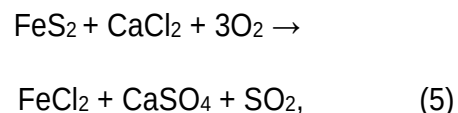


Количество кальцийсодержащего флюса в шихте на окислительный обжиг берется $\approx 120\%$ от стехиометрии реакций (3) и (4). Одновременно в процессе обжига оксиды серы и мышьяка связываются в прочные нерастворимые в воде соединения – сульфат и арсенат кальция, не требующие дополнительного обезвреживания.

Физико-химические свойства основных составляющих соединений огарков арсенатирующего обжига флотоконцентрата на основе пирита и арсенопирита представлены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что соединения, составляющие огарок, обладают высокой температурой плавления (свыше 1450°C), что обуславливает отсутствие какого-либо оплавления огарка в процессе обжига в диапазоне температур $650\text{--}750^\circ\text{C}$.

В состав шихты на обжиг сульфидного концентрата дополнительно вводится хлорсодержащий реагент CaCl_2 . Назначение данной добавки заключается в усилении эффекта термохимического разрушения зерен оксида железа за счет образования промежуточных соединений хлорида железа по реакциям (5) и (6):



Выделяющийся хлор создает также более агрессивную окислительную среду в

Таблица 1

Цианирование исходного флотоконцентрата

Table 1

Cyanidation of the original flotation concentrate

Содержание, г/т				Извлечение, %		Расход реагента, кг/т		
в концентрате		в хвостах цианирования		Au	Ag	NaCN		CaO
Au	Ag	Au	Ag			полный	с учетом остатка	
32,7	294,0	14,68	71,2	55,1	75,8	13,8	11,8	2,8

Таблица 2

Физико-химические свойства основных компонентов огарка арсенатирующего обжига флотоконцентрата

Table 2

Physico-chemical properties of the main components of the calcine of flotation concentrate arsenatizing roasting

Соединение	Т _{плавления} , $^\circ\text{C}$	Плотность, г/см ³	Растворимость в H_2O
CaSO_4	1450	2,96	Малорастворим
$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	1455	3,62	Нерастворим
Fe_2O_3	1562	5,26	Нерастворим
CaO	2614	3,35	Реагирует



реакционном объеме обжигаемого материала, взаимодействует с цветными и драгоценными металлами; серебро, в частности, переводится в химически более активную форму хлоридов, что способствует повышению извлечения этого металла при цианидной обработке огарка.

Для проведения исследования по окислительно-арсенатизирующему обжигу применяли камерную печь сопротивления с карбидокремневыми нагревателями.

После предварительной шихтовки навески флотационного концентрата и извести помещали в специальный противень, изготовленный из нержавеющей термостойкой стали и загружали в камерную печь при заданной температуре (рис. 2 а).

Установлено, что при температуре 650°C через 4–5 минут после загрузки противня с шихтой в камеру печи в объеме материала развивается интенсивное химическое взаимодействие экзотермического характера с покраснением материала (рис. 2 б). Температура в реакционном объеме материала достигает (визуально) 700–750°C. Продолжительность экзотермической стадии процесса обжига составляет 25–30 мин. На рис. 2 представлены изображения навески шихты до и в период процесса обжига.

Обжиг шихты при установленной температуре протекал без выделения в газовую фазу оксидов серы и мышьяка. После завершения процесса противень с огарком выгружали из печи и охлаждали до комнатной температуры.

Огарок, получаемый при окислительно-арсенатизирующем обжиге шихты, представлял собой порошкообразный, частично агрегатированный продукт красновато-сиреневого цвета. Основные данные и результаты проведенных экспериментов обжига флотоконцентрата показаны в табл. 3.

С целью определения эффективности окисления сульфидных золотосодержащих минералов, полученный огарок цианировали в сорбционном режиме.

Результаты экспериментов по переработке флотационного концентрата по схеме «арсенатизирующий обжиг – цианирование огарка» приведены в табл. 4.

Из результатов, представленных в табл. 3 и 4, можно сделать вывод, что оптимальная загрузка дополнительного реагента CaCl_2 при обжиге материала данного состава составляет около 3% от веса исходного флотоконцентрата. Оптимальная температура обжига – 650°C, а продолжительность обжига – 1 час.

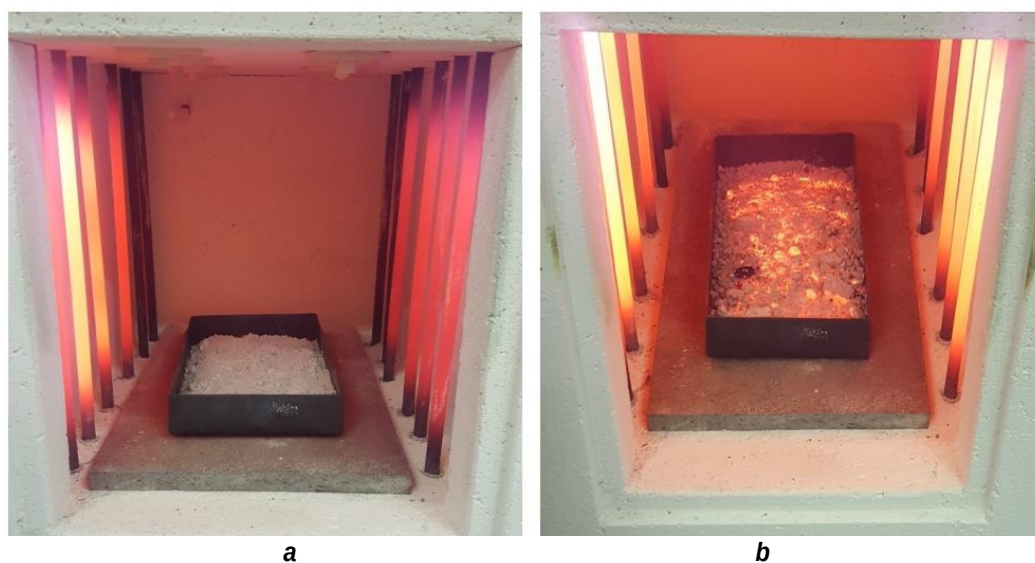


Рис. 2. Окислительный арсенатизирующий обжиг флотоконцентрата месторождения «Иккижелон»; навески шихты до (а) и в период процесса (б) обжига
Fig. 2. Oxidation arsenatizing roasting of flotation concentrate charge from Ikkijelon deposit before (a) and during (b) roasting



Таблица 3

Условия и результаты опытов окислительного арсенатизирующего обжига флотационного концентрата

Table 3

Conditions and results of the experiments on oxidation arsenatizing roasting of the flotation concentrate

№	Время обжига, час	Температура, °C	Содержание CaCl ₂ в шихте, %	Содержание в огарке, %				Степень окисления, %
				Fe _{общ.}	Fe _{сульфид.}	As _{общ.}	As _{сульфид.}	
1	4	650-750	-	16,3	0,15	6,65	0,06	99,3
2	2	650	-	17,5	0,22	6,98	0,05	99,5
3	2	650	1	14,7	0,50	6,55	0,06	99,6
4	1	650	3	15,1	0,46	6,32	0,06	99,6

Таблица 4

Результаты цианирования огарка

Table 4

Calcine cyanidation results

№	Содержание, г/т				Извлечение		Расход реагента, кг/т		
	в огарке		в кеке цианирования		Au	Ag	NaCN		CaO
	Au	Ag	Au	Ag			полный	с учетом остатка	
1	16,3	146,4	6,8	126,0	63,4	24,5	13,0	8,1	1,98
2	16,3	146,4	6,0	118,0	66,6	27,0	15,8	13,6	1,97
3	16,3	146,4	5,8	108,0	67,0	31,4	16,2	10,6	1,96
4	18,3	148,9	5,8	75,9	68,3	49,1	16,2	11,7	1,95

Значения извлечения золота и серебра из огарка, полученные при обжиге в условиях опыта № 4 (см. табл. 4), при цианировании составили 68,3 и 49,1%, соответственно; это $\approx$ в 2 раза выше извлечения серебра из огарков, по сравнению с опытами № 1 и № 2.

К недостатку данного способа следует отнести высокий расход NaCN (16,2 кг/т) и недостаточный уровень извлечения

драгоценных металлов. Можно предположить, что невысокая степень извлечения золота и серебра в результате окислительного арсенатизирующего обжига обусловлена образованием на вскрытых частицах золота и серебра пассивирующих пленок из легкоплавких соединений, поэтому хвосты цианирования огарков имеют повышенное содержание данных драгоценных металлов.

Заключение

На основании анализа полученных результатов исследований можно сделать вывод, что исследуемый флотоконцентрат является упорным к цианированию. Для подготовки упорного мышьяковистого флотоконцентрата к цианированию испытано применение арсенатизирующего обжига. Извлечение золота по технологии «арсена-

тизирующий обжиг – цианирование» возросло на 13,2% по сравнению с цианированием исходного флотоконцентрата.

Полученные результаты исследований по технологии арсенатизирующего обжига служат основанием для изыскания новой, перспективной технологии извлечения драгоценных металлов из упорного сырья.



В дальнейшем авторами планируется проведение исследования по технологии автоклавного окисления флотоконцен-

трата с последующим извлечением драгоценных металлов из отмытых твердых остатков автоклавного окисления цианированием.

Библиографический список

1. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Руда и металлы, 2013. 452 с.
2. Лодейщиков В.В. Извлечение золота из упорных руд и концентратов. М.: Недра, 1968. 203 с.
3. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. 775 с.
4. Hussin A.M. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria // *Materials Testing*. 2012. Vol. 54. № 5. P. 351–357.
5. L. Rusanen, J. Aromaa, O. Forsen Pressure Oxidation of Pyrite-Arsenopyrite Refractory Gold Concentrate // *Academic Journal, Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2013. Vol. 49. No. 1. 101 p.
6. Пат. 2398034 РФ, C22B11/06. Способ переработки сульфидных золотосодержащих мышьяково-сурьмянистых концентратов или руд / Бакшеев С.П., Тупицын С.Н., Кожевников О.В.; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество Золотодобывающая компания «Полюс»; заявл. 2009.03.30; опубл. 27.08.2010. Бюл. № 24.
7. Баликов С.В., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г. Обжиг золотосодержащих концентратов. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2002. 416 с.
8. Гурман М.А. Использование термохимических методов при переработке золотосодержащих пирит-арсенопиритовых концентратов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013. № 4. С. 180–186.
9. De Michelis, I., et al. Roasting and Chlorine Leaching of Gold-Bearing Refractory Concentrate: Experimental and Process Analysis // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013. Vol. 23. P. 709–715.
10. Рахманов О.Б., Аксенов А.В., Минеев Г.Г., Солихов М.М., Шомуродов Х.Р. Поиск рациональной технологии переработки упорных золотосодержащих руд с тонковкрапленным золотом месторождения «Иккижелон» (Северный Таджикистан) // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 6 (125). С. 119–127.
11. Рахманов О.Б., Аксенов А.В., Немчинова Н.В., Солихов М.М., Черношвец Е.А. Поиск оптимальной технологии переработки золотосодержащих руд месторождения «Иккижелон» (Республика Таджикистан) // *Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2017»: труды XX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. (г. Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 г.)*. Новокузнецк, 2017. Ч. 1. С. 118–122.
12. Рахманов О.Б., Аксенов А.В., Минеев Г.Г., Назаров Х.М., Каримов М.И. Переработка упорного золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон» с использованием автоклавного окисления // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 8. С. 163–172. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-8-163-172>
13. Пат. 2307181 РФ, C22B 11/00. Способ извлечения золота из сульфидных руд и концентратов / Лобанов В.Г., Агеев Н.Г., Уфимцев В.М., Радионов Б.К., Притчин А.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет УГТУ-УПИ; заявл. 2006.04.13; опубл. 27.09.2007. Бюл. № 27.
14. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В. Технология переработки золотосодержащего сырья. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 328 с.

References

1. Zakharov B.A., Meretukov M.A. *Zoloto: upornye rudy* [Gold: refractory ores]. Moscow: Ruda i metally Publ., 2013, 452 p. (In Russian).
2. Lodeishchikov V.V. *Izvlechenie zolota iz upornykh rud i kontsentrato* [Gold recovery from refractory ores and concentrates]. Moscow: Nedra Publ., 1968, 203 p. (In Russian).
3. Lodeishchikov V.V. *Tekhnologiya izvlecheniya zolota i serebra iz upornykh rud* [Technology of gold and silver extraction from refractory ores]. Irkutsk, ОАО «Irgiredmet» Publ., 1999, 775 p. (In Russian).
4. Hussin A.M. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria. *Materials Testing*, 2012, vol. 54, no. 5, pp. 351–357.
5. L. Rusanen, J. Aromaa, O. Forsen Pressure Oxidation of Pyrite-Arsenopyrite Refractory Gold Concentrate. *Academic Journal, Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2013, vol. 49, no. 1, 101 p.
6. Baksheev S.P., Tupitsyn S.N., Kozhevnikov O.V. *Sposob pererabotki sul'fidnykh zolotosoderzhashchikh mysh'yakovo-sur'myanistykh koncentratov ili rud* [Processing procedure of sulphide gold-bearing arsenic-antimony concentrates or ores]. Patent RF, no. 2398034, 2010.
7. Balikov S.V., Dementev V.Ye., Mineev G.G. *Obzhig zolotosoderzhashchikh koncentratov* [Roasting of gold-bearing concentrates]. Irkutsk: IRGIREDMET JSC, 2002. 416 p. (in Russian).



8. Gurman M.A. Use of thermochemical methods in processing of gold-bearing pyrite-arsenopyrite concentrates. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2013, no. 4, pp. 180–186. (In Russian).
9. De Michelis, I., et al. Roasting and Chlorine Leaching of Gold-Bearing Refractory Concentrate: Experimental and Process Analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, vol. 23, pp. 709–715.
10. Rakhmanov O.B., Aksenov A.V., Mineev G.G., Solikhov M.M., Shomyrodov Kh.R. Search for rational technologies to process refractory gold ores with finely disseminated from the Ikkiyelon deposit (North Tajikistan). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 6, pp. 119–127. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2017-6-119-127. (In Russian).
11. Rakhmanov O.B., Aksenov A.V., Nemchinova N.V., Solihov M.M., Chernoshvec E.A. Poisk optimal'noj tekhnologii pererabotki zolotosoderzhashchij rudy mestorozhdeniya "Ikkizhelon" (RespublikaTadzhikistan) [Search for the optimal processing technology for gold-bearing ores from the Ikkiyelon deposit (Republic of Tajikistan)]. *Trudy XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo. Metallurgiya – 2017"*, Novokuzneck, 15–16 November 2017. [Proceedings of XX International scientific and practical conference "Metallurgy: technologies, innovation, quality. Metallurgy - 2017", Novokuznetsk, 15–16 November 2017]. Novokuznetsk, 2017, pp.118–122. (In Russian).
12. Rakhmanov O.B., Aksenov A.V., Mineev G.G., Nazarov Kh.M., Karimov M.I. Processing of refractory gold-arsenic flotation concentrate of Ikkiyelon deposit by pressure oxidation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 8, pp. 163–172. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-8-163-172>
13. Lobanov V.G., Ageev N.G., Ufimtsev V.M., Radionov B.K., Pritchin A.A. *Sposob izvlecheniya zolota iz sul'fidnyh rud i koncentratov* [Method of gold extraction from sulphide ores and concentrates]. Patent RF, no. 2307181, 2007.
14. Bocharov V.A., Ignatkina V.A., Abryutin D.V. *Tekhnologiya pererabotki zolotosoderzhashchego syr'ya* [Processing technology of gold-bearing raw materials]. Moscow: Izdatelskiy dom MISiS, 2011, 328 p. (In Russian).

Критерии авторства

Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Минеев Г.Г., Давлатов Х.Ё. провели исследование химического состава исходных проб и продуктов переработки, предложили направления дальнейших технологических исследований для изыскания рациональных способов переработки упорного золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рахманов Одилжон Бозорович, аспирант кафедры металлургии цветных металлов, e-mail: rakhmanov.salam@mail.ru

Аксенов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, e-mail: aksenov@tomsgroup.ru

Минеев Геннадий Григорьевич, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры металлургии цветных металлов, e-mail: kafmcm@istu.edu

Давлатов Хисрав Ёрмахмадович, магистрант, e-mail: khisravyor@mail.ru

Authorship criteria

Rakhmanov O.B., Aksenov A.V., Mineev G.G., Davlatov Kh.E. have studied the chemical composition of initial samples and derivative products. They proposed the directions for further technological studies aimed at finding the rational ways of processing refractory gold-containing arsenic flotation concentrate. 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

Odilzhon B. Rakhmanov, Postgraduate Student of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: rakhmanov.salam@mail.ru

Aleksandr V. Aksenov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: aksenov@tomsgroup.ru

Gennady G. Mineev, Dr. Sci. (Eng.), Visiting Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: kafmcm@istu.edu

Khisorav E. Davlatov, Master's degree student, e-mail: khisravyor@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.721.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-187-196>

Получение лигатур магний-цинк-редкоземельный металл в расплаве солей

© С.А. Савченков*, В.Л. Уголков**

*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме: Цель – изучение процесса получения лигатур Mg-Zn-РЗМ и определение перечня факторов магниетермического процесса для выявления оптимальных технологических режимов. В работе использованы различные современные методы анализов. Рентгенофлуоресцентный анализ проведен с помощью последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 (Shimadzu). Идентификация фаз выполнялась с применением рентгеновского порошкового дифрактометра XRD-6000 (Shimadzu). Комплексный термический анализ проводился на установке STA 429 CD (NETZSCH) в алундовых тиглях с крышками, в потоке аргона (с использованием держателя тиглей типа «TG+DTA»). В результате металлотермического восстановления неодима, гадолиния и иттрия из фторидно-хлоридных расплавов магнием в присутствии цинка получены лигатуры Mg-Zn-РЗМ с различным процентным содержанием легирующих элементов. Предлагаемый способ восстановления РЗМ из фторидно-хлоридных расплавов позволяет извлекать неодим, гадолиний и итрий в процентном соотношении до 99,6%. Полученные лигатуры характеризуются однородностью и жидкотекучестью, что способствует их равномерной разливке по ложницам.

Ключевые слова: магниевые лигатуры, неодим, гадолиний, итрий, металлотермическое восстановление, хлоридно-фторидные расплавы

Информация о статье: Дата поступления 21 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 25 января 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2019 г.

Для цитирования: Савченков С.А., Уголков В.Л. Получение лигатур магний-цинк-редкоземельный металл в расплаве солей. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):187–196. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-187-196.

Mg-Zn-REM master alloy production in molten salts

Sergey A. Savchenkov, Valery L. Ugolkov

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg 199106, Russian Federation

Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences (ISC RAS), St. Petersburg 199106, Russian Federation

Abstract: The paper deals with the process of obtaining Mg-Zn-REM (rare earth metal) master alloys and determination of the list of factors of the magnesium thermal process in order to identify optimal technological regimes. The study uses modern analysis methods. X-ray fluorescence analysis is carried out using the XRF-1800 sequential X-ray fluorescence spectrometer (Shimadzu). Phase identification is performed with the use of X-ray powder diffractometer XRD-6000 (Shimadzu). A complex thermal analysis is carried out on the STA 429 CD (NETZSCH) installation in alundum crucibles with lids in the argon stream using a crucible holder of the Tg+DTA type. As a result of the metallothermic reduction of neodymium, gadolinium and yttrium from fluoride-chloride melts by magnesium in the presence of zinc the master alloys Mg-Zn-REM have been obtained with different percentages of alloying elements. The proposed method of REM recovery from fluoride-chloride melts allows to extract neodymium, gadolinium and yttrium in the percentage ratio up to 99.6%. The obtained master alloys are homogeneous and fluid, able to be evenly poured into molds.

Keywords: magnesium master alloys, neodymium, gadolinium, yttrium, metallothermic recovery, fluoride-chloride melts
Information about the article: Received December 21, 2018; accepted for publication January 25, 2019; available online February 28, 2019.

For citation: Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. Mg-Zn-REM master alloy production in molten salts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):187–196. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-187-196.



Введение

Достижение повышенных прочностных и жаропрочных свойств в литейных магниевых сплавах осуществляется путем их легирования перспективными элементами, включая выбор и оптимизацию режимов термической обработки. Перспективным может быть комплексное легирование несколькими редкоземельными металлами (РЗМ) иттриевой (Y, Nd) и цериевой (Ce, La, Pr) подгрупп в разных соотношениях. Введение иттрия, неодима и гадолиния в определенных соотношениях в систему магний-цинк-цирконий приводит к значительным изменениям фазового состава сплава, повышению термической стабильности твердого раствора и упрочняющих фаз [1–5]. Известно, что РЗМ вводят в магниевые и алюминиевые сплавы в виде лигатур, которые получают двумя основными способами: сплавлением чистых компонентов и восстановлением легирующего металла из его соединений [6–10]. Наибольший практический

интерес представляет разработка технологии получения тройных магниевых лигатур металлотермическим способом восстановления РЗМ из их соединений, при обеспечении высокого выхода восстанавливаемого редкоземельного металла [11–13]. Введение цинка в состав лигатур магний-неодим, магний-гадолиний, магний-иттрий обеспечивает снижение их температуры плавления и увеличивает растворимость в них редкоземельных металлов. Применение тройных лигатур магний-цинк-РЗМ может быть эффективно использовано при производстве магниевых сплавов, содержащих цинк и РЗМ (неодим, гадолиний, иттрий), например, в системах: Mg-Zn-Y-Nd, Mg-Gd-Y-Zn-Mn, Mg-Y-Zn-Zr [14–18].

Целью настоящего исследования является изучение процесса получения тройных лигатур Mg-Zn-Nd, Mg-Zn-Gd, Mg-Zn-Y из хлоридно-фторидных расплавов.

Оборудование, материалы и методика проведения экспериментов

Исследование и выбор технологических параметров плавки осуществляли на основании проведенных поисковых опытов и анализа научно-технической информации в области основных технологических параметров получения магниевых лигатур.

Комплексный термический анализ проводился на установке STA 429 CD немецкой фирмы NETZSCH в алундовых тиглях с крышками в потоке аргона при скоростях нагрева и охлаждения 10°C в минуту (с использованием держателя тиглей типа «TG+DTA» с термопарами типа «S» (Pt-PtRh10)). При этом одновременно получали кривые изменения массы – TG в «%» от исходной навески и кривые изменения DTA в «μV/mg».

В качестве лабораторного оборудования была использована шахтная электропечь с карбидокремниевыми нагревателями. Для увеличения скорости протекания полной обменной реакции расплавленных солей с магнием и цинком все плавки проводились при перемешивании расплава при

помощи стального импеллера.

Элементный анализ образцов полученных лигатур проводили при помощи последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 японской фирмы «Shimadzu». Идентификация фаз производилась с применением рентгеновского порошкового дифрактометра XRD-6000 фирмы «Shimadzu», снабженного высокотемпературной камерой HA1001 (CuK_α-излучение, диапазон углов 2θ = 10–80°, скорость съемки 2°/мин). Металлографическое исследование образцов полученных лигатур выполняли на оптическом микроскопе Axio Lab.A1 немецкой фирмы Carl Zeiss.

Все опыты проводились с чушковым магнием марки Mg 98 и гранулированным цинком (ч.д.а.) с варьированием их процентного соотношения, при этом в роли восстановителя выступал магний, а цинк выполнял функцию термического возбудителя реакции. Квалификация исходных солей: YF₃, KCl, NaCl, CaCl₂ «х.ч.», NdF₃ и GdF₃ «ч» (ТУ



6-09-4677-83). Плавки проводились по следующей методике. Предварительно подготавливали технологическую солевую смесь, состоящую из хлоридов щелочных и щелочноземельных элементов и одного из фторидов РЗМ, а именно $35\text{KCl} + 35\text{NaCl} + 30\text{CaCl}_2$ и NdF_3 , GdF_3 и YF_3 . Затем смесь тщательно перемешивалась, после чего перемешенную солевую смесь совместно с магнием и цинком помещали в тигель, который устанавливался в печь, выдерживали при заданной температуре в течение определенного времени при непрерывном перемешивании,

после окончания восстановительной реакции расплав отстаивался заданное время, в течение которого происходило расслоение продуктов реакции: верхний слой – расплав солей; нижний – лигатура Mg-Zn-PZM . Далее поверхностный расплав солей сливали в шлаковую изложницу, а полученную лигатуру разливали в чушки. Технологичность процесса определялась следующими параметрами: процентным извлечением (выходом) РЗМ в лигатуру, ее жидкотекучестью, равномерным распределением РЗМ в полученных чушках и санитарными условиями труда.

Результаты исследования

Для выявления закономерностей магнетермического восстановления неодима, гадолиния и иттрия из фторидно-хлоридных расплавов были проведены термические исследования взаимодействия солевых смесей с магнием и цинком. На рис. 1–3 представлены кривые T , TG и DTA , полученные при первом нагревании и первом охлаждении чушкового магния, гранулированного цинка в соотношении 1:2 совместно с солевой смесью KCl , NaCl , CaCl_2 и NdF_3 , YF_3 и GdF_3 в динамическом потоке аргона при скорости нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры 780°C , и скоростью $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры 800°C с последующим охлаждением расплава со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Масса навесок составляла 310 мг.

Выявлено, что после расплавления (эндотермический эффект с максимумом при $435,5^\circ\text{C}$) цинк активно начинает взаимодействовать с магнием, что характеризуется экзотермическим пиком с минимумом при $446,6^\circ\text{C}$. При температуре минимума $573,2^\circ\text{C}$ наблюдается второй экзотермический эффект, свидетельствующий о протекании процесса восстановления фторида неодима магний-цинковым расплавом. Эндотермический эффект с максимумом при $696,4^\circ\text{C}$, лучше всего соответствуют плавлению солевой смеси, которая при охлаждении дает тепловой эффект кристаллизации при $723,6^\circ\text{C}$. Кроме того, на кривых охлаждения четко наблюдается два тепловых эффекта кристаллизации металлических

фаз с максимумами при $512,0^\circ\text{C}$ и $325,3^\circ\text{C}$, соответствующие кристаллизации образовавшегося тройного соединения Mg-Zn-Nd , и магний-цинкового сплава. Потери массы в диапазоне температур $90\text{--}190^\circ\text{C}$ можно объяснить испарением влаги из солевой смеси. Потери массы в диапазоне $760\text{--}800^\circ\text{C}$ можно объяснить угаром магния и цинка, при этом за цикл нагрева и охлаждения суммарные потери составили 2,49 % от массы навески.

При нагревании смеси солей $\text{Mg-Zn-GdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ (рис. 2) отмечено начало плавления цинка при температуре $409,9^\circ\text{C}$ с максимумом при $433,7^\circ\text{C}$, при этом после окончательного расплавления цинка прослеживается начало его взаимодействия с магнием, с экзотермическим эффектом, с минимумом при $494,7^\circ\text{C}$. Последующий экзотермический эффект с минимумом при $559,3^\circ\text{C}$, вероятнее всего, соответствующий процессу восстановления гадолиния магний-цинковым расплавом. Эндотермический эффект с максимумом при $613,2^\circ\text{C}$, вероятно, соответствует плавлению солевой смеси, а максимум при $653,1^\circ\text{C}$ соответствует плавлению непрореагировавшего магния. На кривой охлаждения обнаруживается максимум эндотермического эффекта кристаллизации металлической фазы при $512,9^\circ\text{C}$, соответствующий кристаллизации образовавшегося тройного соединения Mg-Zn-Gd . За цикл нагрева и охлаждения суммарные потери составили 1,99 % от массы навески.

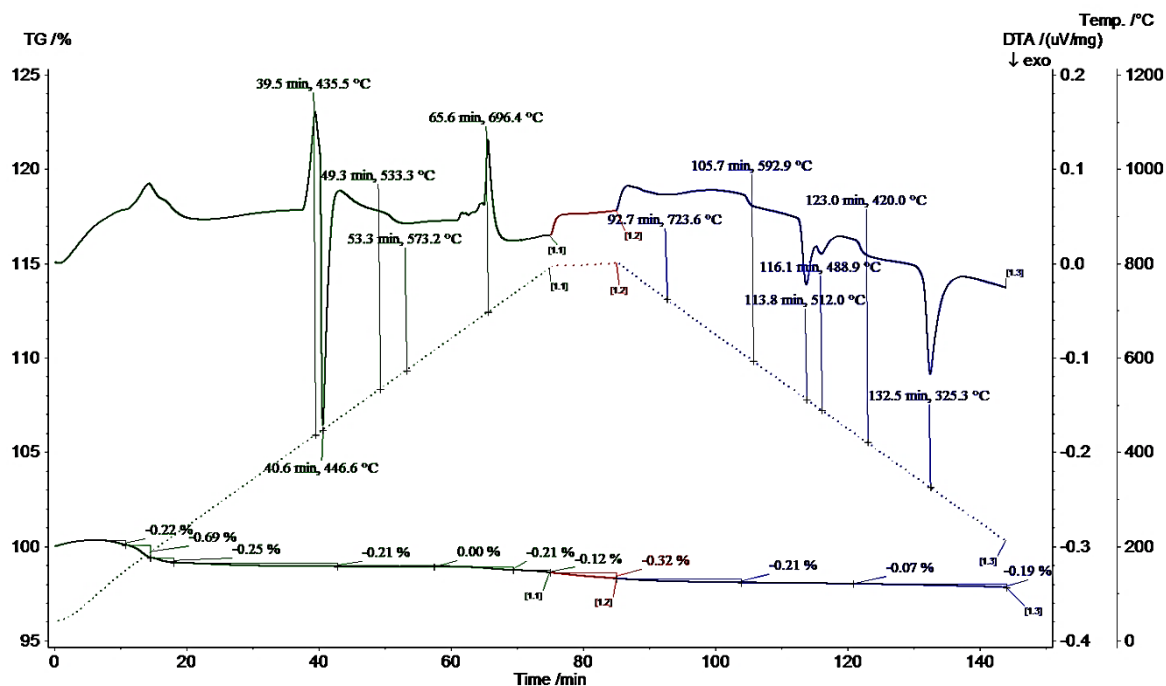


Рис. 1. Кривые TG, DTA и T исследуемого образца $\text{Mg-Zn-NdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ в зависимости от времени при нагревании до 800 °C
Fig. 1. Curves TG, DTA and T of the studied sample $\text{Mg-Zn-NdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ as a function of time when heated to 800 °C

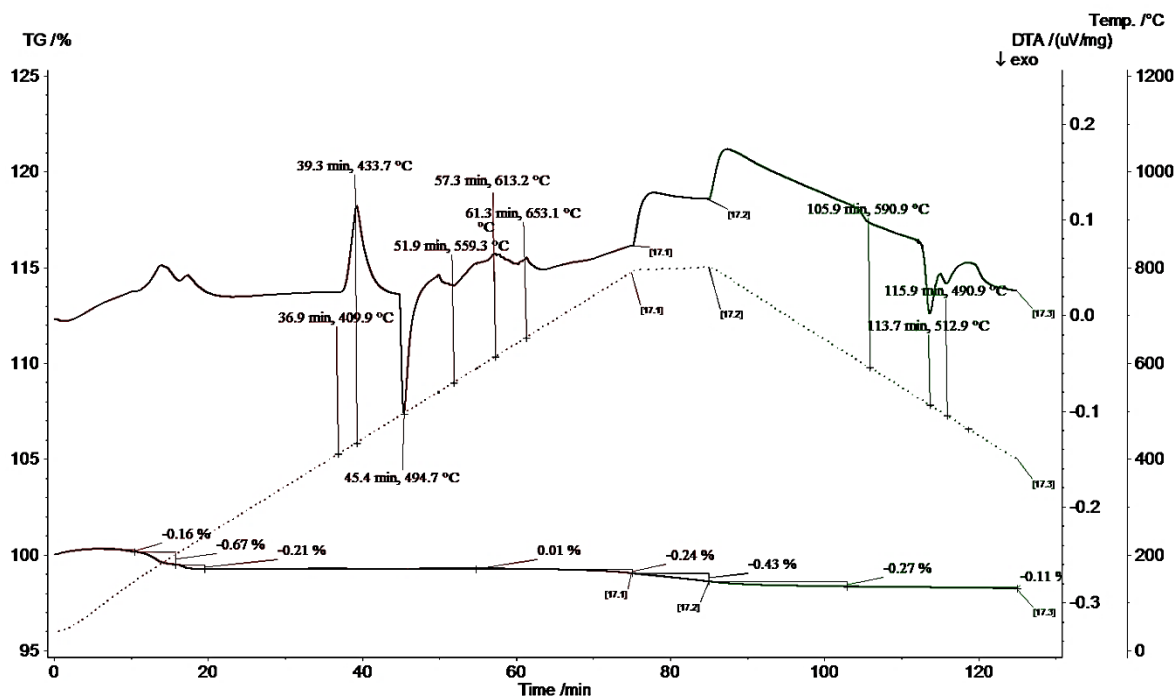


Рис. 2. Кривые TG, DTA и T исследуемого образца $\text{Mg-Zn-GdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ в зависимости от времени при нагревании до 800 °C
Fig. 2. Curves TG, DTA and T of the studied sample $\text{Mg-Zn-GdF}_3\text{-KCl-NaCl-CaCl}_2$ as a function of time when heated to 800 °C



Характер взаимодействия магния и цинка с фторидом иттрия в расплаве хлоридов $KCl-NaCl-CaCl_2$ (рис. 3) аналогичен взаимодействию с фторидами неодима и гадолиния. Плавление цинка сопровождается эндотермическим эффектом с максимумом при $434,7^\circ C$, после чего данный эффект перекрывается экзотермическим эффектом взаимодействия расплавленного цинка и магния с минимумом при $445,6^\circ C$ и последующим экзотермическим эффектом с минимумом при $585,3^\circ C$; вероятнее всего, данный пик свидетельствует о протекании экзотермической реакции восстановления иттрия. Начиная от этого значения температуры происходит поглощение тепла при плавлении солей с максимумом при $596,2^\circ C$, а при $640^\circ C$ проявляется еще один пик, характеризующий плавление солевой смеси. На кривых охлаждения обнаруживается максимумы эндотермических эффектов кристаллизации металлических фаз при $509,9^\circ C$, соответствующие кристаллизации образовавшегося тройного соединения $Mg-Zn-Y$ и $320,2,9^\circ C$, соответствующие кристаллизации образовавшегося магний-цинкового сплава. Максимумы эндотермических эф-

фектов ($588,8$ и $351,1^\circ C$) соответствуют кристаллизации солевой смеси. Потери массы в диапазоне температур $100-200^\circ C$, так же, как и в предыдущих опытах, можно объяснить испарением влаги из солевой смеси. Значительные потери массы при температуре $720-800^\circ C$ связаны с угаром магния и цинка. Суммарные потери составили $3,65\%$.

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования получения лигатур $Mg-Zn-Nd$, $Mg-Zn-Gd$, $Mg-Zn-Y$. Температурные режимы плавки регулировались в соответствии с проведенным термическим анализом, время выдержки варьировалось от 10 до 40 минут, все плавки также проводились с использованием механического перемешивания.

В таблице приведены результаты одной серии опытов, характеризующие показатели процесса.

В результате проведенных плавки были получены лигатуры с содержанием РЗМ от 10 до 30 % масс. (рис. 4–6), причем необходимое содержание РЗМ в лигатуре достигалось корректировкой содержания фторидов РЗМ в технологической солевой смеси $KCl-NaCl-CaCl_2$.

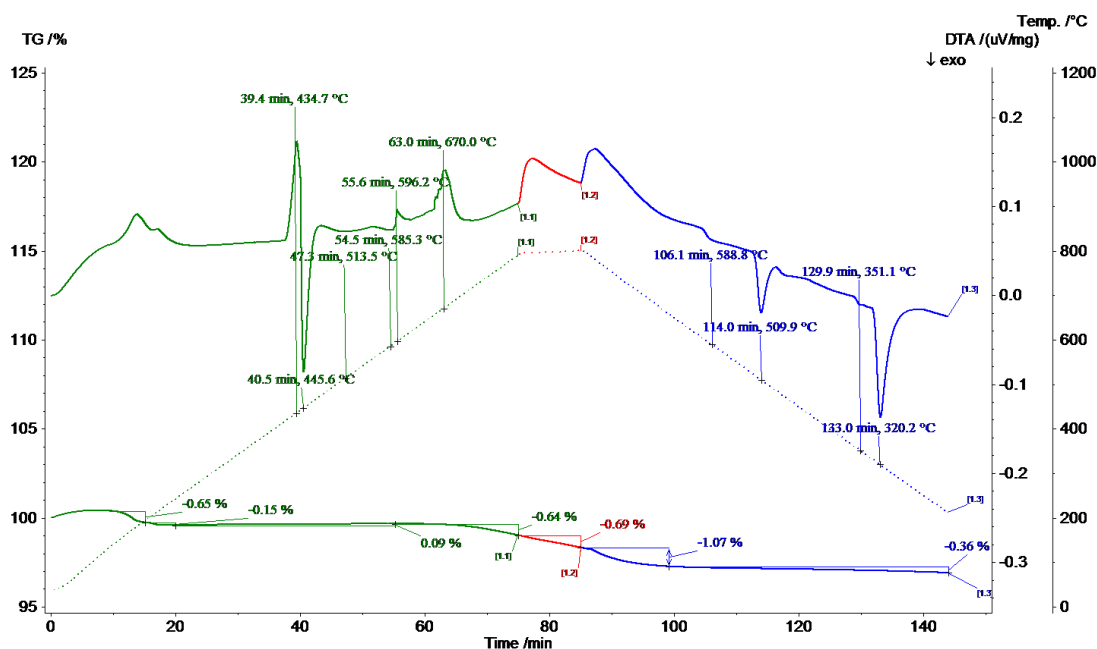


Рис. 3. Кривые TG, DTA и T исследуемого образца $Mg-Zn-YF_3-KCl-NaCl-CaCl_2$ в зависимости от времени при нагревании до $800^\circ C$

Fig. 3. Curves TG, DTA and T of the studied sample $Mg-Zn-YF_3-KCl-NaCl-CaCl_2$ as a function of time when heated to $800^\circ C$



Результаты синтеза лигатуры Mg-Zn-РЗМ
Results of Mg-Zn-REM master alloy synthesis

№ плавки	Отношение Mg/Zn	Фторид РЗМ	Извлечение, %	Фактический состав лигатуры, %		
				Mg	Zn	РЗМ
1	2:1	NdF_3	99,1	55,24	25,49	19,28
2	1:1	NdF_3	98,4	35,60	35,40	29,0
3	1:2	NdF_3	99,6	23,19	54,75	22,06
4	2:1	GdF_3	86,2	60,12	28,49	11,39
5	1:1	GdF_3	88,4	37,11	35,62	27,27
6	1:2	GdF_3	96,4	20,19	54,75	25,06
7	2:1	YF_3	40,4	62,12	29,49	8,39
8	1:1	YF_3	65,4	36,78	38,19	25,03
9	1:2	YF_3	97,2	28,34	56,03	15,63



a



b

Рис. 4. Лигатура Mg-Zn-Nd: а – слиток; б – излом
Fig. 4. Master alloy Mg-Zn-Nd: a – ingot; b – fracture



a



b

Рис. 5. Лигатура Mg-Zn-Gd: а – слиток; б – излом
Fig. 5. Master alloy Mg-Zn-Gd: a – ingot; b – fracture



a



b

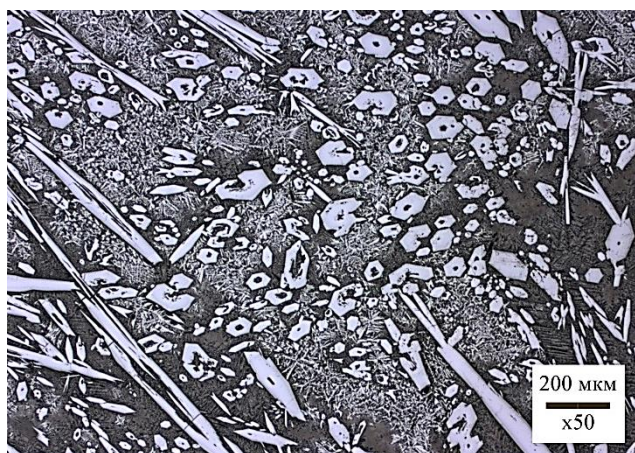
Рис. 6. Лигатура Mg-Zn-Y: а – слиток; б – излом
Fig. 6. Master alloy Mg-Zn-Y: a – ingot; b – fracture

В ходе экспериментов установлено, что добавка цинка к шихте способствует снижению температуры начала экзотермического эффекта восстановления РЗМ за счет того, что цинк при 450–500°C начинает активно взаимодействовать с магнием, образуя расплав, после чего начинается экзотермическая реакция восстановления РЗМ с образованием тройного соединения типа $Mg_xP3M_yZn_z$.

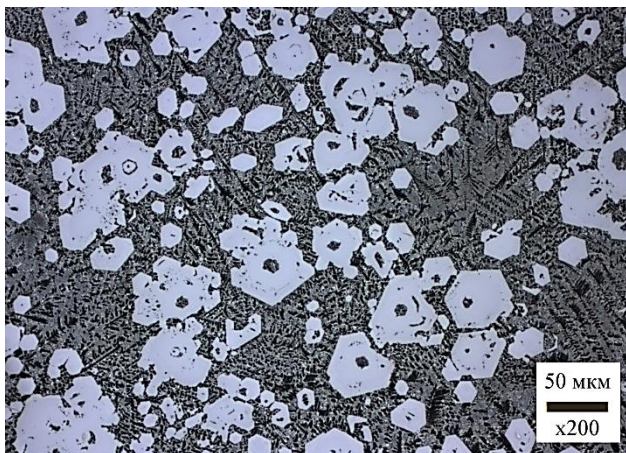
Максимальное извлечение неодима достигает 99,6%, гадолиния – 96,4%, иттрия – 97,2%. Полученные данные свидетельствуют о повышении степени восстановления гадолиния и иттрия при повышении содержания цинка в шихте. Лигатуры соответ-

ствуют содержанию основных контролируемых примесей, % масс., соответственно: кальций – 0,02, железо – 0,02, медь – 0,01, никель – 0,0025, кремний – 0,01.

Микроструктурный анализ полученных лигатур показал (рис. 7–9), что полученные лигатуры с неодимом и гадолинием имеют структуру твердого раствора с равномерным распределением по объему магниевой матрицы интерметаллидов $Mg_xP3M_yZn_z$. Количество интерметаллических соединений в лигатуре повышается по мере повышения содержания РЗМ. Микроструктура лигатуры магний-цинк-иттрий характеризуется замкнутой сеткой, образующейся при содержании иттрия около 15%.

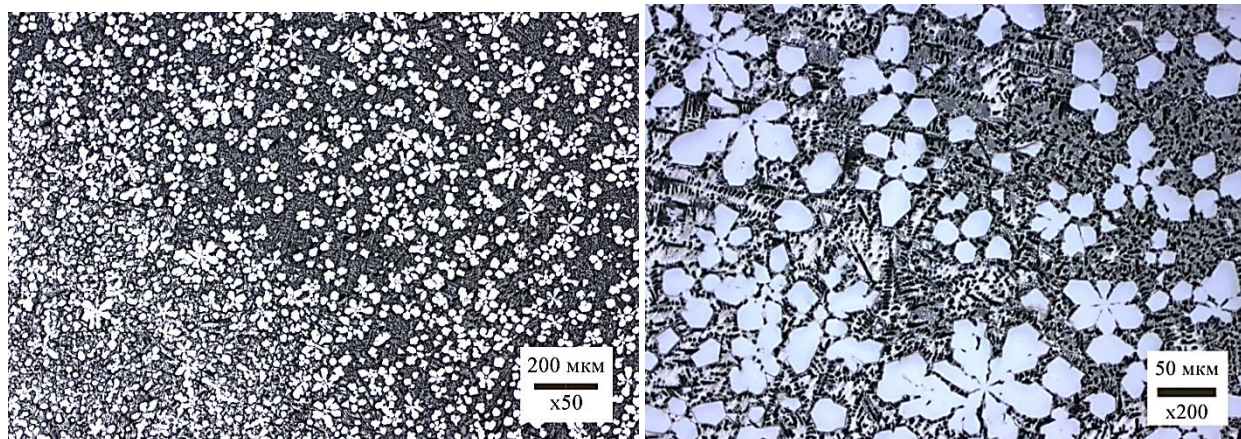


a



b

Рис. 7. Лигатура 25Mg-50Zn-25Nd: а – x50; б – x200
Fig. 7. Master alloy 25Mg-50Zn-25Nd: a – x50; b – x200

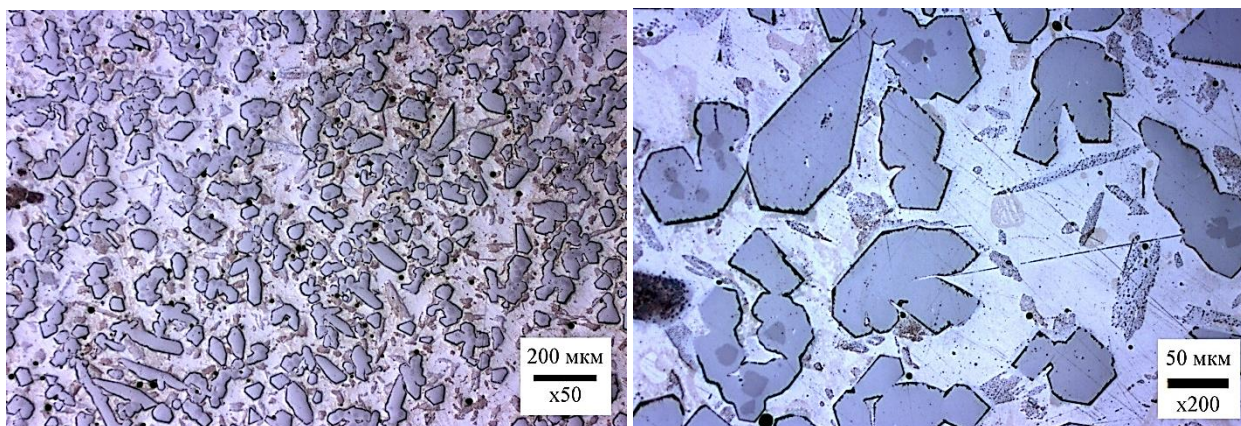


a

b

Рис. 8. Лигатура 25Mg-50Zn-25Gd: а – $\times 50$; б – $\times 200$

Fig. 8. Master alloy 25Mg-50Zn-25Gd: a – $\times 50$; b – $\times 200$



a

b

Рис. 9. Лигатура 35Mg-50Zn-15Y: а – $\times 50$; б – $\times 200$

Fig. 9. Master alloy 35Mg-50Zn-15Y: a – $\times 50$; b – $\times 200$

Заключение

Таким образом, в результате дифференциально-термического анализа определены температуры экзотермических и эндотермических эффектов при взаимодействии солевой смеси фторидов РЗМ-KCl-NaCl-CaCl₂ с магнием в присутствии цинка.

Выявлено, что оптимальные пределы отношения магния к цинку составляют 1:2, при этом затрачивается минимальное время на проведение реакции восстановления РЗМ из солевой смеси и обеспечиваются благоприятные условия для работы перемешивающих устройств. Содержание легирующего элемента в сплаве достигается предварительной корректировкой со-

держания исходного соединения фторида в технологической солевой смеси.

Доказано, что добавление цинка к шихте способствует повышению выхода иттрия и гадолиния в лигатуру, что может быть вызвано образованием соединений типа $Mg_xPZM_yZn_z$, при образовании которого выделяется значительное количество тепла.

Полученные экспериментальные данные являются предпосылкой для разработки технологии производства тройных РЗМ-содержащих лигатур на основе магния для использования в цветной и черной металлургии.



Библиографический список

1. Фролов А.В., И.Ю. Мухина, А.А. Леонов, З.П. Уридия Влияние легирования редкоземельными металлами на свойства и структуру литейного магниевого сплава экспериментального состава системы Mg-Zr-Zn-Y-Nd // Труды ВИАМ. 2016. № 3 (39). С. 23–29.
2. Каблов Е.Н., Волкова Е.Ф., Филонова Е.В. Влияние РЗЭ на фазовый состав и свойства нового жаропрочного магниевого сплава системы Mg-Zn-Zr-PЗЭ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. № 7. С. 19–26.
3. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 212–222.
4. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). С. 2–12.
5. Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Волкова Е.Ф. Научное наследие академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2013. № 9. С. 71–78.
6. Белкин Г.И. Производство магний-циркониевых лигатур и сплавов. М.: Metallurgizdat, 2001. 146 с.
7. Wei Guobing, Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Weidong, Wei Qunyi. Structure Heredity Effect of Mg-10Y Master Alloy in AZ31 Magnesium Alloy. Rare Metal Materials and Engineering. 2013. Vol. 42. Issue 10. P. 2009–2013.
8. Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Sunyun, Wei Guobin, Yang Yan. Effects of Different State Mg-5Sr-10Y Master Alloys on the Microstructure Refinement of AZ31 Magnesium Alloy. Rare Metal Materials and Engineering. 2013. Vol. 42. Issue 12. P. 2421–2426.
9. Кавалла Р., Бажин В.Ю. Изотропность свойств листовых заготовок из магниевых сплавов // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 828–832.
10. Косов Я.И., Бажин В.Ю. Синтез лигатуры алюминий-эрий из хлоридно-фторидных расплавов // Расплавы. 2018. № 1. С. 14–28.
11. Осинкина Т.В., Красиков С.А., Жилина Е.М., Агафонов С.Н., Ведмидь Л.Б., Жидовинова С.В. Влияние ниобия и тантала на особенности фазообразования при металлотермическом взаимодействии алюминия с диоксидом титана // Расплавы. 2018. № 5. С. 553–560.
12. Жилина Е.М., Красиков С.А., Агафонов С.Н. Расчет активности титана и циркония в алюмокальциевом оксидном расплаве // Расплавы. 2016. № 4. С. 300–306.
13. Савченков С.А., Бажин В.Ю. Синтез магниевых лигатур во фторидно-хлоридных расплавах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 214–224.
14. Zhiqiang Zhang, Xuan Liu, Wenyi Hu, Jiahao Li, Qichi Le, Lei Bao, Zhenjia Zhu, Jianzhong Cui. Microstructures, mechanical properties and corrosion behaviors of Mg-Y-Zn-Zr alloys with specific Y/Zn mole ratios // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 624. P. 116–125.
15. Савченков С.А. Анализ диаграмм плавкости итрийсодержащих галогенидных систем. Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 4 (58). С. 82–86.
16. Savchenkov S.A., Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Prospects of nanometallurgy application in the preparation of master alloys and composite materials. Smart Nanocomposites. 2015. Vol. 6. No. 2. 203 p.
17. Du B.N., Xiao Z.P., Qiao Y.X., Zheng L., Yu B.Y., Xu D.K., Sheng L.Y. Optimization of microstructure and mechanical property of a Mg-Zn-Y-Nd alloy by extrusion process // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 775. P. 990–1001.
18. Wang Jingfeng, Xie Feizhou, Liu Shijie, Huang Song, Pan Fusheng. Hot Deformation Behavior and Processing Maps of As-Homogenized Mg-Gd-Y-Zn-Mn Alloy // Rare Metal Materials and Engineering. 2018. Vol. 47. Issue 6. P. 1700–1707.

References

1. Frolov A.V., I.Yu. Muhina, A.A. Leonov, Z.P. Uridiya. An influence of rare-earth metals doping on properties and structure of the experimental Mg-Zr-Zn-Y-Nd casting magnesium alloy. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 3, pp. 23–29. (In Russian)
2. Kablov E.N., Volkova E.F., Filonova E.V. Effect of REE on the phase composition and properties of new refractory magnesium alloy of the Mg - Zn - Zr - REE system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metals Science and Heat Treatment of Metals], 2017, no. 7, pp. 19–26. (In Russian)
3. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Muhina I.Yu. Application perspectives of magnesium and casting aluminium alloys. *Aviacionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 5, pp. 212–222. (In Russian)
4. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V. Ways of improving the basic mechanical characteristics of magnesium deformable alloys. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 10, pp. 2–12. (In Russian)
5. Duyunova V.A., Goncharenko E.S., Muhina I.YU., Uridiya Z.P., Volkova E.F. Science heritage of academician I. N. Fridlyander. Modern investigations of magnesium and casting aluminium alloys in all-Russian scientific research institute of aviation materials “VIAM”. *Cvetnye metally* [Non-Ferrous Metal], 2013, no. 9, pp. 71–78. (In Russian)
6. Belkin G.I. *Proizvodstvo magnij-cirkonievyyh ligatur i splavov* [Production of magnesium-zirconium master alloys and alloys]. Moscow: Metallurgizdat Publ., 2001. 146 p.



7. Wei Guobing, Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Weidong, Wei Qunyi. Structure Heredity Effect of Mg-10Y Master Alloy in AZ31 Magnesium Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, vol. 42, Issue 10, pp. 2009–2013.
8. Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Sunyun, Wei Guobin, Yang Yan. Effects of Different State Mg-5Sr-10Y Master Alloys on the Microstructure Refinement of AZ31 Magnesium Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, vol. 42, Issue 12, pp. 2421–2426.
9. Kavalla R., Bazhin V.Yu. Isotropy of magnesium alloy blank properties. *Zapiski Gornogo Instituta* [Journal of Mining Institute], 2016, vol. 222, pp. 828–832. (In Russian)
10. Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Synthesis of aluminium-erbium master alloy from chloride-fluoride melts. *Raspilav* [Melts], 2018, no. 1, pp. 14–28. (In Russian)
11. Osinkina T.V., Krasikov S.A., Zhilina E.M., Agafonov S.N., Vedmid' L.B., Zhidovinova S.V. Influence of niobium and tantalum on peculiarities of phase formation at metallurgical interaction between aluminium and titanium dioxide. *Raspilav* [Melts], 2018, no 5, pp. 553–560. (In Russian)
12. Zhilina E.M., Krasikov S.A., Agafonov S.N. Calculation of titanium and zirconium activity in aluminocalcium oxide melt. *Raspilav* [Melts], 2016, no. 4, pp. 300–306. (In Russian)
13. Savchenkov S.A., Bazhin V.Yu. Synthesis of magnesium master alloys in fluoride-chloride melts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 5, pp. 214–224. (In Russian)

14. Zhiqiang Zhang, Xuan Liu, Wenyi Hu, Jiahao Li, Qichi Le, Lei Bao, Zhenjia Zhu, Jianzhong Cui. Microstructures, mechanical properties and corrosion behaviors of Mg–Y–Zn–Zr alloys with specific Y/Zn mole ratios. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 624, pp. 116–125.
15. Savchenkov S.A. Analysis of fusion diagrams of yttrium-containing halide systems. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2017, no. 4, pp. 82–86. (In Russian)
16. Savchenkov S.A., Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Prospects of nanometallurgy application in the preparation of master alloys and composite materials. *Smart Nanocomposites*, 2015, vol. 6, no. 2, 203 p.
17. B.N.Du, Z.P.Xiao, Y.X.Qiao, L.Zheng, B.Y.Yu, D.K.Xu, L.Y.Sheng. Optimization of microstructure and mechanical property of a Mg–Zn–Y–Nd alloy by extrusion process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 775, pp. 990–1001.
18. Wang Jingfeng, Xie Feizhou, Liu Shijie, Huang Song, Pan Fusheng. Hot Deformation Behavior and Processing Maps of As-Homogenized Mg–Gd–Y–Zn–Mn Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, vol. 47, Issue 6, pp. 1700–1707.

Критерии авторства

Савченков С.А., Уголков В.Л. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов, и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Savchenkov S.A., Ugolkov V.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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савченков Сергей Анатольевич, аспирант,
e-mail: savchenkov.tlc@bk.ru
Уголков Валерий Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории исследований наноструктур,
e-mail: ugovkov.52@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Savchenkov, Postgraduate,
e-mail: savchenkov.tlc@bk.ru
Valery L. Ugolkov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher Laboratory of the Nanostructure Research,
e-mail: ugovkov.52@mail.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: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с **приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах)**;
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

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,

(3952) 40-58-57.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 1 (144) 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 28.02.2019 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 25,5.
Тираж 500 экз. Заказ 62. Поз. плана 3н.

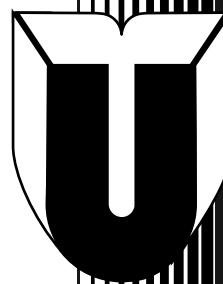
Издание распространяется **бесплатно**

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

