

Том 24 № 2

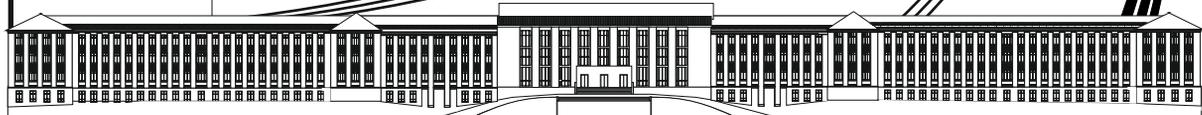
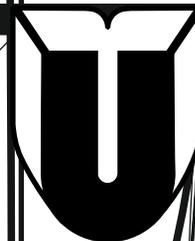
2020

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

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

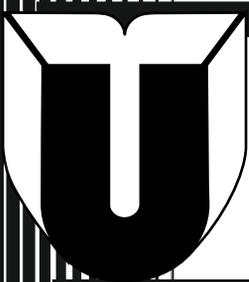
12+



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

Том 24 № 2

2020

Редакционная коллегия

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)

БЛОМЕНШТЕЙН 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 лаборатории 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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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)

ФЕДЕЯЕВ 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)

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания –
6 раз в год

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

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

Учредитель Иркутский национальный
исследовательский технический
университет

Подписной индекс в каталоге
Агентства ЗАО ИД

«Экономическая газета»
«Объединенный каталог. Пресса
России. Газеты и журналы» -
41476 (ОК + ЭК)

Адрес Агентства ЗАО ИД
«Экономическая газета»:
(499) 152-09-89; izdatcat@ideg.ru

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

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

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 24 No. 2
2020

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 JSC «Economic Newspaper»
Publishing House
“The united catalog. Russian press.
Newspapers and journals”-
41476 (OK + EC)
Address of JSC
«Economic Newspaper»
Publishing House: (499) 152-09-89;
izdatcat@ideg.ru

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание 246



Машиностроение и машиноведение

- Дудукало Д.В., Чепчуров М.С., Вагнер М.Ю.** Адаптация токарных технологических систем для получения сложнопрофильных поверхностей в поперечном сечении детали..... 250
- Зайдес С.А., Ву Ван Гюи, Доан Тхань Ван.** Разработка установки для повышения поверхностной твердости цилиндрических деталей..... 262
- Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Ракицкая В.Б., Стародубцева Д.А.** Выбор ширины цилиндрического лепесткового круга для револьверной головки при зачистке крупногабаритных обводообразующих деталей..... 275
- Лукьянов А.В., Кошкин А.В.** Тепловизионный контроль многослойных изделий методами динамической тепловой томографии на базе программы «ThermoFit PRO»... 284
- Мокрицкий Б.Я., Симатов Э.С.** Оценка износостойкости инструментальных покрытий на основе имитационного моделирования..... 295



Энергетика

- Безгрешнов А.Н., Усиков Н.В., Дьяконов Е.М.** Исследование и модернизация тепловой схемы котла ТГМЕ-444 с целью повышения надежности и экономичности его работы..... 303
- Буй Нгок Хунг, Коверникова Л.И.** Анализ возможности применения активных фильтров для снижения несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения одного из угольных карьеров Вьетнама..... 318
- Глазунова А.М., Аксаева Е.С.** Математическая модель асинхронного генератора в задаче оценивания состояния электроэнергетической системы..... 333
- Довудов С.У., Дунаев М.П.** Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей..... 345
- Марьин Г.Е., Осипов Б.М.** Критерии выбора составов топлив при их сжигании в газотурбинных установках с незначительными переделками топливной системы..... 356
- Серебряков Н.А.** Анализ факторов, влияющих на электропотребление групп точек поставки электроэнергии гарантирующего поставщика второго уровня..... 366
- Фишов А.Г., Гуломзода А.Х., Касобов Л.С.** Децентрализованная реконфигурация электрической сети с Microgrid с использованием реклоузеров..... 382
- Шандрыгин Д.А., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Маньшин М.В.** Анализ резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой..... 396



Металлургия и материаловедение

- Александров А.В., Немчинова Н.В.** Расчет ожидаемой экономической эффективности производства алюминия за счет увеличения применения глинозема отечественного производства..... 408
- Булатов К.В., Жуков В.П.** Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа»..... 421
- Гуляшинов П.А., Антропова И.Г., Гуляшинов А.Н.** Исследование процесса термического разложения окисленных и сульфидных руд Озерного месторождения..... 434
- Зобнин Н.Н., Байсанов С.О., Байсанов А.С., Мусин А.М.** Влияние операционных аспектов процесса восстановления оксида кремния на соотношение материального и теплового потоков в рудно-термической печи..... 444
- Рогожников В.А., Дизер О.А., Потапов П.С., Мамяченков С.В.** Термодинамические закономерности гидрохимического окисления сульфидных минералов цветных металлов в азотнокислых средах..... 460

CONTENTS

Contents.....	247
---------------	-----



Mechanical Engineering and Machine Science



⊗ Dudukalo D.V., Chepchurov M.S., Vagner M.Y. Adaptation of turning technological systems for obtaining complex profile surfaces in part cross-section.....	250
⊗ Zaides S.A., Vu Van Huy, Doan Thanh Van. Developing installation to increase cylindrical part surface Hardness.....	262
⊗ Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Rakitskaya V.B., Starodubtseva D.A. Selecting width of cylindrical flap wheels for turret heads when grinding large size outer-forming parts.....	275
⊗ Lukyanov A.V., Koshkin A.V. Use of ThermoFit PRO dynamic thermal tomography in imaging control of multilayer products.....	284
⊗ Mokritskii B.Ya., Sitamov E.S. Evaluation of wear resistance of tool coatings based on simulation modelling.....	295



Power Engineering



⚡ Bezgreshnov A.N., Usikov N.V., Dyakonov E.M. Research and modernisation of TGME-444 boiler thermal cycle in order to increase its reliability and efficiency.....	303
⚡ Bui Ngoc Hung, Kovernikova L.I. The applicability of active filters for reduction of voltage non-sinusoidality in the power supply system of a coal mine in Vietnam.....	318
⚡ Glazunova A.M., Akseva E.S. Mathematical model of an asynchronous generator for assessing the state of an electrical power system.....	333
⚡ Dovudov S.U., Dunaev M.P. Analysis of energy indicators of pulse converters.....	345
⚡ Marin G.E., Osipov B.M. Choice criteria in the composition of fuel applied in gas turbine installations with minor fuel system modifications.....	356
⚡ Serebryakov N.A. Analysis of factors affecting the electricity consumption of a delivery point cluster default provider.....	366
⚡ Fishov A.G., Ghulomzoda A.Kh., Kasobov L.S. Decentralised reconfiguration of a Microgrid electrical network using reclosers.....	382
⚡ Shandrygin D.A., Dovgun V.P., Egorov D.E., Manshin M.V. An analysis of resonant modes in electric power systems with a traction load.....	396



Metallurgy and Materials Science



⚙ Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V. Calculation of the expected economic efficiency of aluminium production by increasing the use of domestic alumina.....	408
⚙ Bulatov K.V., Zhukov V.P. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit.....	421
⚙ Gulyashinov P.A., Antropova I.G., Gulyashinov A.N. Thermal decomposition of oxidised and sulphide ores in the Ozernoye deposit.....	434
⚙ Zobnin N.N., Baisanov S.O., Baisanov A.S., Musin A.M. Effect of silicon oxide reduction operational aspects on material and heat flow ratio in ore-thermal furnace.....	444
⚙ Rogozhnikov V.A., Dizer O.A., Potapov P.S., Mamyachenkov S.V. Thermodynamic patterns for hydrochemical oxidation of non-ferrous metal sulphide minerals in nitric acid media.....	460



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.

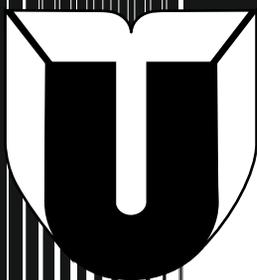
«Вестник ИргТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую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

«Вестник ИргТУ» реферруется 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 621.941

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-250-261>

Адаптация токарных технологических систем для получения сложнопрофильных поверхностей в поперечном сечении детали

© Д.В. Дудукало*, М.С. Чепчуров*, М.Ю. Вагнер**

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

**ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат», г. Старый Оскол, Россия

Резюме: Целью работы является создание алгоритма, на основе которого программное обеспечение позволит спрогнозировать получаемую траекторию снятия припуска, что предоставит возможность создавать точением различные поверхности. Экономические реалии в производственном секторе экономики постоянно подталкивают производителей к снижению затрат на производство продукции, при этом качественные показатели должны только возрастать. Анализ и применение инновационного способа обработки позволяют по-новому взглянуть на использование и модернизацию современного оборудования, имеющегося на производстве, и расширить его технологические возможности за счет сокращения числа операций, выполненных на различных типах металлорежущего оборудования, а также автоматизации процесса получения требуемой конфигурации поверхности с возможностью быстрой переналадки, что ведет к увеличению производительности и расширению номенклатуры выпускаемых изделий. Выполнена схема получения поверхности при токарной обработке вращающимся инструментом, получены формулы для производства сложного несимметричного профиля изделия, составлен алгоритм и разработан программный код в среде Scilab для моделирования с целью получения перемещения режущего инструмента по сложной траектории и его анализа. Рассчитаны перемещения инструмента за один оборот заготовки, построена модель траектории перемещения инструмента. Сформирована таблица данных моделирования профилей, получаемых при различных частотах вращения инструмента и заготовки. Созданные авторами алгоритм и на его основе программное обеспечение позволяют спрогнозировать получаемую траекторию снятия припуска, что даст возможность точением делать различные поверхности, в т.ч. получать эллипсы, многогранники, кулачки в виде плоских спиралей и т.п.

Ключевые слова: обработка, траектория инструмента, функциональная зависимость, адаптивное оборудование, моделирование траектории, алгоритм

Информация о статье: Дата поступления 11 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 19 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Дудукало Д.В., Чепчуров М.С., Вагнер М.Ю. Адаптация токарных технологических систем для получения сложнопрофильных поверхностей в поперечном сечении детали. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 250–261. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-250-261>

Adaptation of turning technological systems for obtaining complex profile surfaces in part cross-section

Denis V. Dudukalo, Mikhail S. Chepchurov, Maxim Yu. Vagner

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

Oskol electrometallurgical plant JSC, Stary Oskol, Russia

Abstract: In this paper, an algorithm is presented for enabling software to predict the trajectory of machining allowance removal, which will provide the possibility to create various surfaces by the turning process. Economic realities in the manufacturing sector of the economy constantly push manufacturers to reduce production costs simultaneously increasing quality indicators. The analysis and application of an innovative processing method allows a fresh look at the application and modernisation of modern equipment available at a factory and expansion of its technological capabilities by reducing the number of operations performed by various types of metal-cutting equipment, as well as by automation of the process of obtaining the required surface configuration with the possibility of quick readjustment, which results in increased productivity and an expanded range of products. A pattern of surface obtaining under turning with a rotating tool is developed. The formulae for complex asymmetric product profile production are derived. The algorithm is compiled and the software code is developed in the Scilab environment for modelling in order to obtain the cutting tool movements

along a complex path and its analysis. The tool movements per one revolution of the workpiece are calculated and a model of the tool trajectory is constructed. A table of profile modelling data obtained at various rotation speeds of the tool and workpiece has been compiled. The presented algorithm and algorithm-based software allow the trajectory of machining allowance removal to be predicted, which can facilitate the production of various surfaces by turning, e.g. ellipses, polyhedrons, cams in the form of flat spirals, etc.

Keywords: processing, tool path, functional dependence, adaptive equipment, trajectory modeling, algorithm

Information about the article: Received February 11, 2020; accepted for publication March 19, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Dudukalo DV, Chepchurov MS, Vagner MY. Adaptation of turning technological systems for obtaining complex profile surfaces in part cross-section. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):250–261. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-250-261>

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение существующих способов оптимизации процессов получения изделий методами механического снятия припуска на этапе совершенствования и разработки технологических процессов изготовления деталей позволяет повысить производительность и качество обработки, а также снизить себестоимость их производства. Модернизировать существующий или разработать новый технологический процесс изготовления деталей – весьма сложная задача, которую можно осуществить при наличии математических моделей, позволяющих определить рациональные условия формообразования при различных видах и методах обработки [1, 2].

Важным фактором при формообразовании поверхности является формирование траектории инструмента. Для обеспечения формирования траектории инструмента при токарной обработке целесообразно воспользоваться адаптивным управлением, позволяющим перенастроить оборудование к получаемой поверхности. При таком управлении необходимо сформировать имеющую возможность изменять параметры или структуру регулятора в зависимости от изменения состояния объекта или внешних возмущений на объект [3], но предварительную постановку задачи управления необходимо выполнить технологически по механической обработке, т.е. получить модель процесса, выполняемую не в автоматическом режиме.

Теория управления играет значительную роль в современных мехатронных системах [4], позволяющих значительно

расширить технологические возможности оборудования механической обработки.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для получения изделий с различными формами поверхности и числом граней целесообразно использовать метод полигонального ротационного точения. Полигональное точение – это метод, который заключается в синхронизации скоростей вращения детали и вращающегося инструмента. Количество граней получаемой поверхности зависит от количества зубьев инструмента и соотношения частот. Стоит отметить, что получаемые поверхности имеют криволинейную форму в поперечном сечении, как это представлено на рис. 1. К тому же если представленные на рис. 1 а–д поверхности действительно можно получить простым целночисленным кратным соотношением частот вращения, то показанная на рис. 1 е поверхность получается значительно сложнее, но представляет больший интерес, т.к. огранку поверхностей можно выполнить и другими способами снятия припуска (кроме точения). Эта поверхность получена неявным целночисленным соотношением частот, и тем более не режущих кромок, соотношение которых всегда дает целое число. Задача управления вращением инструмента и заготовки, по мнению авторов, состоит в том, чтобы найти метод, позволяющий назначить такие параметры резания, которые позволят получить заданную поверхность сложной конфигурации. Объектом исследования при решении аналитической задачи является сам процесс снятия припуска или переме-

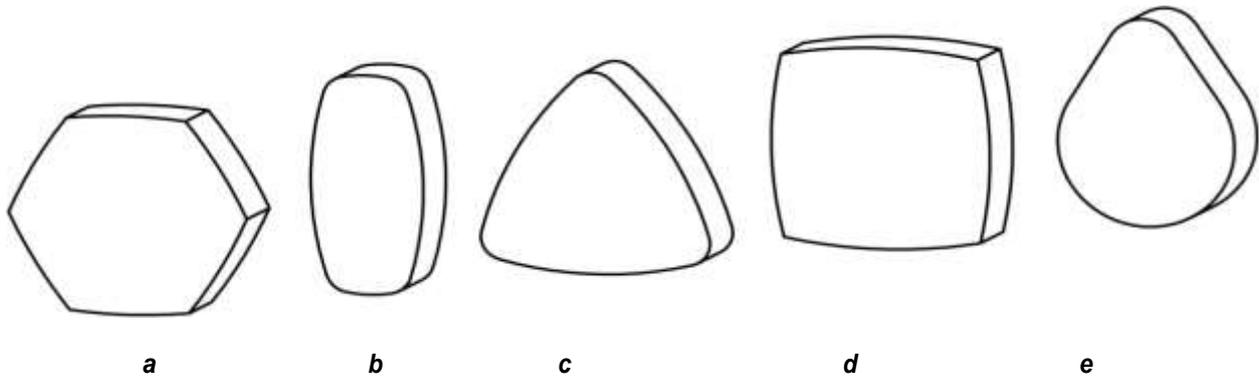


Рис. 1. Геометрические формы, получаемые при различных соотношениях частот, а также при различных количествах режущих элементов инструмента:
а – шестигранник; b – овал; c – треугольник; d – квадрат e – овоид

Fig. 1. Geometric shapes obtained at different frequency ratios and at different numbers of cutting elements in a tool: a – hexagon; b – oval; c – triangle; d – square; e – ovoid

щение режущего инструмента и заготовки для получения сложной траектории. Следует учесть, что траектория снятия припуска в поперечном направлении формируется за счет сложения двух движений: перемещением (вращением) заготовки и инструмента, что создает трудности при идентификации ее опорных точек, позволяющих выполнить аппроксимацию, что усложняет поставленную задачу.

3. МЕТОДЫ

Рассмотрим получение поверхностей при токарной обработке вращающимся инструментом, схема обработки представлена на рис. 2.

Согласно схеме (рис. 2), заготовка радиусом R_s вращается вокруг центра O_s с круговой скоростью ω_s , имеющей частоту вращения n_s [5, 6]. При этом инструмент также вращается вокруг центра O_t , смещенного относительно центра вращения заготовки на X_{st} и Y_{st} , в схеме указаны направления смещения в противоположные направлениям стороны основных осей координат [7], т.е. радиус инструмента R_t и расположение его центра позволяют (согласно схеме) предположить, что сьем припуска выполняется только в третьем квадранте системы координат. Учитывая этот фактор, при расчетах можно использовать только абсолютные значения смещения X_{st} и Y_{st} [8]. При вращении инстру-

мента радиус при вершине режущей части определяет траекторию съема припуска, показанного на рис. 1 заштрихованной линией [9]. Аналогично рассмотренному выше съему припуска с линейными перемещениями инструмента применяют условия съема припуска, где $R_{(i)} < R_s$, т.е. вращающийся вектор R формируется пересечением траектории вращения инструмента и заготовки меньше радиуса заготовки [10]. Начало вектора расположено в точке вращения заготовки, а конец вектора определяется как пересечение вектора, имеющего начало в точке O_s и угол направления $\psi_{(i)}$, также вычисляемый из текущего положения режущего инструмента, а точнее – точки, образующей эквидистанту инструмента [11].

Метод получения сложного несимметричного профиля изделия. Перейдем от круговой скорости вращения заготовки ω_s и инструмента ω_t к оборотам, т.е. n_s и n_t – об/мин или в $\frac{n_s}{60}$ об/с и $\frac{n_t}{60}$ об/с. Разобьем круговую траекторию перемещения заготовки на N участков, причем на такое же количество участков разобьем и траекторию перемещения инструмента, но при различных частотах вращения полная окружность перемещения инструмента будет иметь отличные от окружности параметры заготовки участков, что будет выражаться соотношением частот вращения: $N_t = \frac{n_t}{n_s}$ [12].

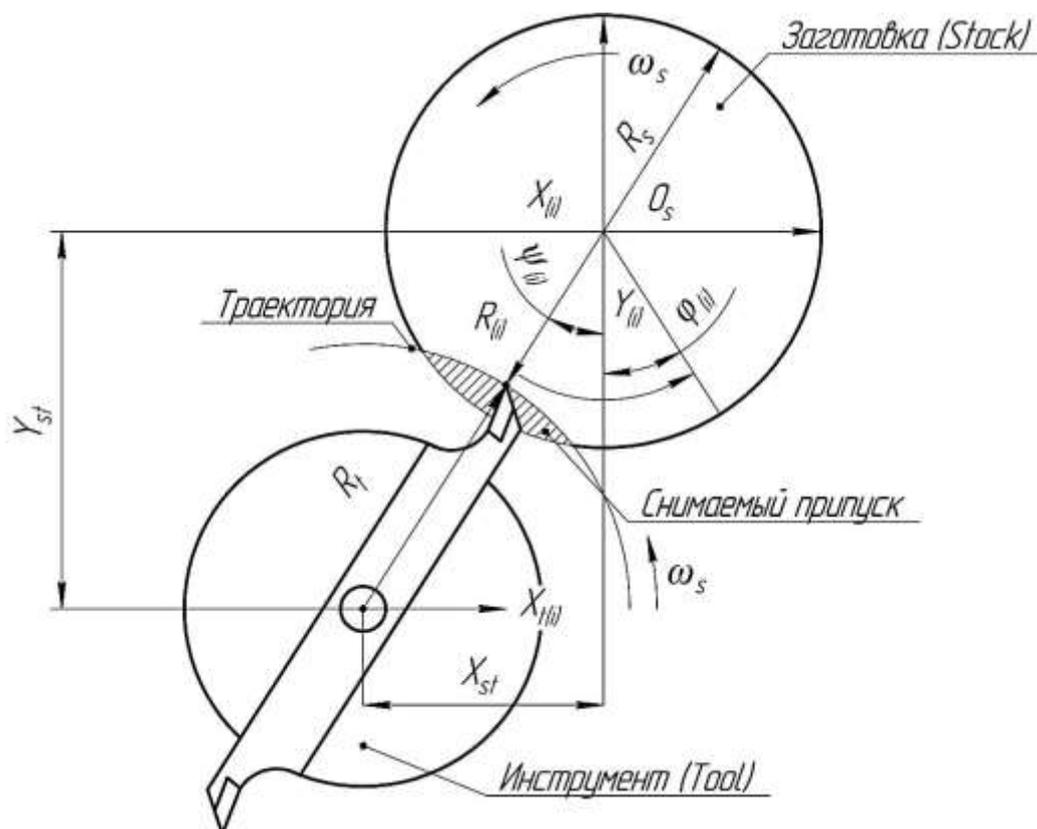


Рис. 2. Схема получения поверхности при токарной обработке вращающимся инструментом
 Fig. 2. Diagram of surface obtaining by turning with a rotating tool

Все расчеты произведем в одной системе координат – системе координат заготовки. Определим координаты радиус-вектора R_t относительно O_s , для чего узнаем величину угла шага перемещения [13]:

$$\varphi t_{(i)} = \frac{2\pi \cdot n_s}{n_t} \cdot i \quad (1)$$

Определим координаты конца радиус-вектора:

$$\begin{aligned} X_i &= -X_{st} + R_t \cdot \sin(\varphi t \cdot i); \\ Y_i &= -Y_{st} + R_t \cdot \cos(\varphi t \cdot i). \end{aligned} \quad (2)$$

Или определим координаты, выполнив подстановку из выражения (1):

$$\begin{aligned} X_i &= -X_{st} + R_t \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot n_s}{n_t} \cdot i\right); \\ Y_i &= -Y_{st} + R_t \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n_s}{n_t} \cdot i\right). \end{aligned} \quad (3)$$

При этом заготовка поворачивается на некоторый угол $\varphi_{(i)}$, следовательно, угол между условным положением радиус-вектора и полученным радиус-вектором R_i определяют как сумму угла φ_s и угла между

вектором R и осью Y ; обозначим его через ψ_i , таким образом, угол между начальным радиус-вектором и текущим радиус-вектором R_i будет определен выражением [14]:

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{N} \cdot i + \psi_i \quad (4)$$

Находим величину угла ψ_i :

$$\psi_i = R \cdot \cos \cdot \frac{X_i}{R_i} \quad (5)$$

Соответственно, находим величину текущего радиус-вектора R_i :

$$R_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (6)$$

Подставим из выражения 3 соответствующие значения:

$$R_i = \sqrt{\left(-X_{st} + R_t \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot n_s}{n_t} \cdot i\right)\right)^2 + \left(-Y_{st} + R_t \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n_s}{n_t} \cdot i\right)\right)^2} \quad (7)$$



Формирование поверхности со съемом припуска происходит только тогда, когда радиус R_i меньше радиуса исходной заготовки R_s , что при наличии смещения центра вращения инструмента вполне возможно и при начальном (стартовом) положении радиус-вектора, т.е. съем припуска начинается не с определяемой стартовым или нулевым радиус-вектором точки, а с другого положения, определяемого смещением центра вращения инструмента [15].

Моделирование получения перемещения режущего инструмента по сложной траектории. Выполним провер-

ку высказанных предположений о формировании поверхности режущим инструментом с использованием программного средства. Авторами выбран пакет Scilab¹ [16, 17]. Составим предварительно алгоритм расчета, схема которого представлена на рис. 2. Он не нуждается в специальных комментариях, за исключением того, что разработан без учета отвода инструмента после выполнения первой траектории съема припуска, а их может быть несколько, в зависимости от соотношения частот вращения режущего инструмента и заготовки.

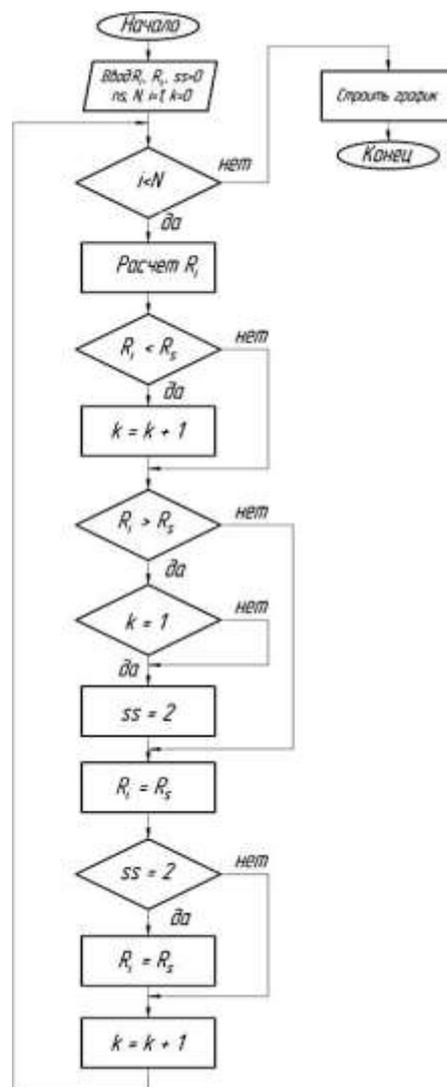


Рис. 3. Схема алгоритма формирования радиус-векторов
Fig. 3. Radius-vector formation algorithm

¹ Андриевский А.Б., Андриевский Б.Р., Капитонов А.А., Фрадков А.Л. Решение инженерных задач в SCILAB: учеб. пособ. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 97 с.

Для обеспечения отрисовки на графике только одной траектории в алгоритм введены переменные² [18]: k – первое вхождение в зону $R_i < R_s$; ss – невозможность отображения второй и последующей траектории, если первая уже выполнена. По мнению авторов, подобно этому элементу, при условии, если $n_t > n_s$, легко можно выполнить и другие простые элементы путем быстрого перемещения суппорта, что вполне возможно с режущим инструментом в продольном направлении с последующим его возвратом в начальную точку резания по мере достижения начального угла резания – уже при подводе. Длина отвода при этом соответствует длине обрабатываемой поверхности, а частота подвода составляет 30 Гц при частоте вращения 1800 об/мин, что вполне достижимо на современном оборудовании.

Ниже представлен текст программы на языке SciLab, позволяющей моделировать получение различных профилей.

```
clear
//Число шагов на окружности
N=360
//Частота вращения шпинделя,
об/мин
n=880;
//Радиус заготовки, мм
Rs=20;
//Радиус инструмента, мм
Rt=10
//Смещение инструмента
Xt=20; Yt=20
//Частота вращения инструмента,
об/мин
nt=2000
//Время выполнения одного оборо-
та заготовки, с
tr=1/(n/60)
//Время выполнения одного оборо-
та инструмента, с
tt=1/(nt/60)
//Угол смещения инструмента
fiT=0
```

```
//Расчет радиусов по участкам
i=1;R(i)=0;k=0;ss=0
while i<N
//fi=2*pi/N
fit(i)=fiT+2*(%pi/N)*(nt/n)*i
X(i)=Xt-Rt*cos(fit(i))
Y(i)=Yt-Rt*sin(fit(i))
R(i)=sqrt((Y(i))^2+(X(i))^2)
fi(i)=(2*pi/N)*i+asin(X(i)/R(i))
fig(i)=fi(i)*180/%pi
if R(i)<Rs then
k=1
end
if (R(i)> Rs) | (R(i)=Rs) then
if k=1 then
ss=2
end
R(i)=Rs
//fig(i)=360/N*i
// else
// i=i-1
// for j=1:i
//RR(j)=R(j);fiR(j)=fi(j);figR(j)=fig(j)
//end
//break
end
if ss=2 then
R(i)=Rs
end
i=i+1
end
polarplot(fi,R,style=2).
```

В таблице приведены результаты моделирования с использованием этой программы.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

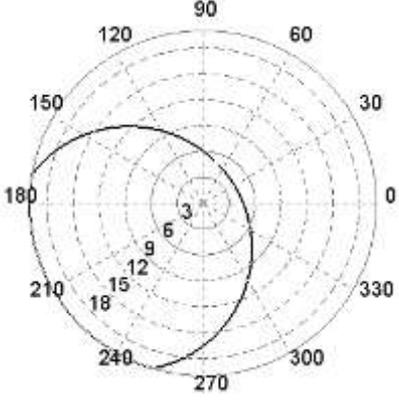
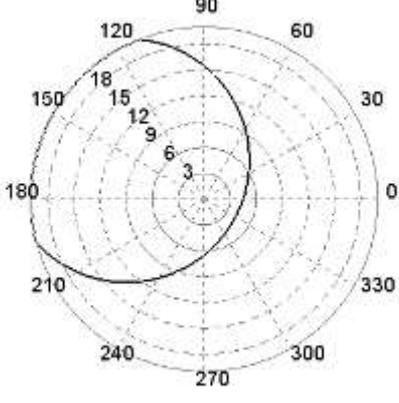
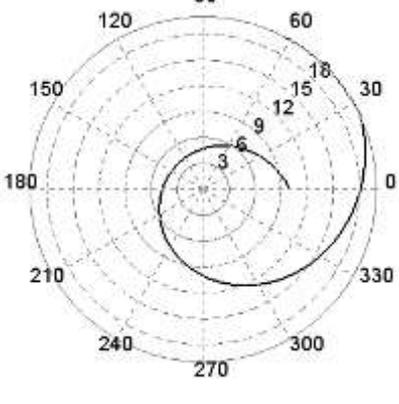
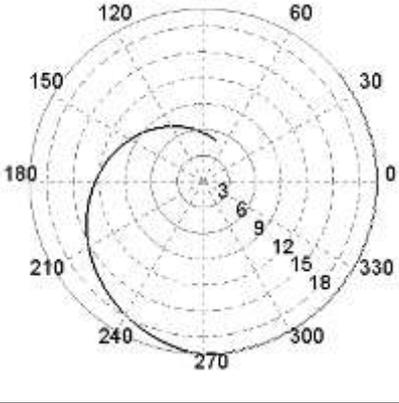
В 1–3 строках таблицы, когда частота вращения инструмента в два раза превышает частоту вращения заготовки, четко прослеживаются две получаемые поверхности, но их профиль не имеет прямого сечения, как в выполненной Д.Л. Бекасовым

²Громов Ю.Ю., Дидрих И.В., Иванова О.Г. Информационные технологии: учебник. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. 260 с.



Моделирования профилей, получаемых при различных частотах вращения инструмента и заготовки
Modeling of profiles obtained at different rotation speeds of the tool and workpiece

№№	Частота вращения		Угол начальный, град.	Траектория
	заготовки	инструмента		
1	100	200	0	
2	100	200	45	
3	100	200	90	
4	100	100	0	

5	100	100	45	
6	100	100	90	
7	200	100	0	
8	200	100	45	



9	200	100	90	
---	-----	-----	----	--

работе [19], т.е. получение граней и лысок пока не можем утверждать. Очевидно, что подобрав соответствующее соотношение частот вращения заготовки и инструмента, можно получить грани, причем их количество будет кратно соотношению частот вращения. В зависимости от величины начального угла установки инструмента изменяется только расположение получаемого профиля или его поворот относительно центра вращения заготовки [20].

Гораздо больший интерес представляют данные в строках таблицы, начиная с 7: при частоте вращения заготовки, большей, чем частота вращения инструмента, происходит формирование некоего профиля с изменяющимся радиусом, также, как и у кулачка. При изменении начального угла преобразуется величина формируемого на заготовке радиуса при снятии припуска. Таким образом, задав заранее заданное соотношение частот вращения заготовки и инструмента, а также величину начального угла можно получить кулачок с заданным профилем, причем по всей длине заготовки, но при выполнении токарной операции. Если проанализировать выражение 7 настоящей работы, то можно сделать заключение о том, что именно оно является ключевым в определении профиля получаемого кулачка и позволяет адаптировать технологическую систему на базе токарного оборудования к получению изделий с различными сложными профилями. При необходимости этот профиль может быть изменен вдоль оси детали, а в качестве шага изменения профиля можно принять величину продольной подачи инструмента.

Работы, выполненные по получению сложнопрофильных поверхностей при токарной обработке ранее, в т.ч. одним из авторов, не предполагали смещения продольной оси вращения инструмента и были направлены на получение прямолинейных поверхностей, а возможность смещения оси вращения инструмента по вертикали относительно оси вращения заготовки значительно расширяет технологические возможности токарного оборудования. При этом не требуется линейное перемещение инструмента относительно центра вращения заготовки, что упрощает управление процессом снятия припуска.

Современные токарно-фрезерные технологические системы, оснащенные дополнительным фрезерным приспособлением, позволяют получить аналогичные поверхности (получение эксцентричных поверхностей на токарном станке стоит рассматривать как частный случай), но следует учесть, что это достаточно сложные дорогостоящие системы и некорректные с позиций технологии получения контура. Напомним: осью Z при токарной обработке является ось вращения заготовки, а при фрезерной обработке этой осью является ось вращения инструмента, что требует перехода к другой системе координат при получении профиля кулачка фрезерной обработкой, а, соответственно, снижает точность получаемого профиля. Да и само перемещение в плоскости обработки является интерполяцией, состоящей из прямых отрезков, что также влияет на точность и качество получаемых поверхностей, а в предлагаемом автором подходе скорость

вращения инструмента не изменяется в течение одного оборота заготовки, следовательно, получаемый профиль плавный, без резких, хотя и незначительных, переходов. Переход от получения цилиндрической поверхности изделия с более сложной, не имеющей выраженного центра вращения, выполняется без смены системы координат.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доказано, что при получении более одной поверхности требуется превышение частоты вращения инструмента над частотой вращения заготовки, а при обратном соотношении возможно получение поверхностей, описываемых спиралью Архимеда. При этом ширина снимаемого слоя зависит от соотношения радиусов инструмента и заготовки, а также расположения центра вращения инструмента, если же центр

вращения инструмента расположен по обеим осям на расстояниях, превышающих его радиус, то снятие припуска невозможно.

Созданные авторами алгоритм и на его основе программное обеспечение позволяют спрогнозировать получаемую траекторию снятия припуска, что позволит создавать точением различные поверхности, в т.ч. получать эллипсы, кулачки в виде плоских спиралей и т.п.

Следует учесть, что в предложенной авторами схеме обработки заготовок в виде строжней (см. рис. 2) затрачиваемая на снятие припуска мощность распределяется на круговое движение заготовки и инструмента. Выраженное через главное движение усилие, затрачиваемое на снятие припуска, нельзя отнести к какому-либо одному приводу, что требует применения для приводов инструмента практически такой же мощности, как и для привода заготовки.

Библиографический список

1. Ласточкин Д.А., Скуратов Д.Л. Совершенствование метода определения рациональных условий формообразования поверхностей на окончательных операциях механической обработки заготовок // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2006. № 2-1. С. 197–202.
2. De Ping Yu, Sze Wei Gan, Yoke San Wong, Rahman M., Geok Soon Hong. Optimized tool path generation for fast tool servo diamond turning of micro-structured surfaces // International Journal Advanced Manufacturing Technology. 2012. No. 63. P. 1137–1152.
3. Краснов С.В., Гурьянов Д.А., Краснов С.С. Интеллектуальное управление мехатронных системах // Вестник ВУиТ. 2011. № 17. С. 100–104.
4. Tomizuka M. Applications of Digital and Adaptive Control Theories to Mechatronic Systems // Perspectives in Control. 1998. P. 237–245. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-1276-1_17 (25.05.2019).
5. Chepchurov M.S., Tyurin A.V., Zhukov E.M. Getting flat surfaces in turning // World Applied Sciences Journal. 2014. Vol. 30. No.10. P. 1208–1213.
6. Чепчуров М.С., Тюрин А.В. Выполнение лысок на токарных автоматах // Технология машиностроения. 2013. № 11. С. 14–16.
7. Чепчуров М.С., Тюрин А.В. технологические системы на базе автоматов продольного точения с использованием модульной компоновки оборудования // Технология машиностроения. 2013. № 7. С. 64–69.
8. Пелипенко Н.А. Математическая модель формообразования цилиндрической поверхности при безрамной технологии обработки крупногабаритных деталей // Вестник машиностроения. 1988. № 5. С. 40–41.
9. Пелипенко Н.А., Санин С.Н. Определение положения измерительной базы при базировании и вращении эллиптического банджа // Тяжелое машиностроение. 2014. № 1. С. 32–36.
10. Чепчуров М.С., Погонин Д.А., Старостин С.В. Определение оптимальных технологических параметров токарной обработки с ударом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2010. № 10. С. 9–11.
11. Чепчуров М.С., Табекина Н.А. Снижение временных затрат при получении изделий на прутковых автоматах с устройством сортировки // Вестник Ир-

³Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618333. Программа для получения сложнопольных изделий со сложным профилем поперечного сечения токарной обработки / Дудукало Д.В., Чепчуров М.С. Правообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Заявл. 27.06.2019; опублик. 27.06.2019.



кутского государственного технического университета. 2016. № 6. С. 64–72. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-64-72>

12. Дудукало Д.В., Сумской А.М. Об определении отклонения центра вращающегося, катящегося тела // Образование. Наука. Производство: материалы X Междунар. молодежного форума с междунар. участием (г. Белгород, 1–15 октября 2018 г.). Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. С. 1788–1793.

13. Manos N.P., Bedi S., Miller D., Mann S. Single controlled axis lathe mill // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007. No. 32. P. 55–65.

14. Li Qiang, Ai Wu, Chen Bing. Variable angle compensation control of noncircular turning // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. No. 70. P. 735–746. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5286-1>

15. Чепчуров М.С., Жуков Е.М., Блудов А.Н. спосо-

бы проекционной оценки геометрии объектов в машиностроении и их реализация. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. 149 с.

16. Кунву Ли. Основы САПР CAD/CAM/CAE. СПб: Изд-во Питер, 2004. 560 с.

17. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 1999. 475 с.

18. Громов Ю.Ю., Иванова О.Г., Алексеев В.В., Ивановский М.А., Швец Д.П. Специальные разделы теории управления. Оптимальное управление динамическими системами. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012. 108 с.

19. Бекасов Д.Л., Воронов В.Н. Методика расчета основных геометрических параметров некруглых профилей, обработанных фрезоточением // *Технология машиностроения*. 2008. № 4. С. 16–17.

20. Бекасов Д.Л. Фрезоточение некруглых профилей с продольной подачей // *Технология машиностроения*. 2008. № 3. С. 9–10.

References

1. Lastochkin DA, Skuratov DL. Improving the method for determining surface rational condition formation on final operations of workpiece machining. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tehnika, tehnologii i mashinostroenie* = *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2006;2-1:197–202. (In Russ.)

2. De Ping Yu, Sze Wei Gan, Yoke San Wong, Rahman M, Geok Soon Hong. Optimized tool path generation for fast tool servo diamond turning of micro-structured surfaces. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 2012;63:1137–1152.

3. Krasnov SV, Guryanov DA, Krasnov SS. Intelligent control in mechanotronic systems. *Vestnik Volzhskogo universiteta imeni V.N. Tatishcheva* = *Vestnik of Volzhsky University after V.N. Tatischev*. 2011;17:100–104. (In Russ.)

4. Tomizuka M. Applications of Digital and Adaptive Control Theories to Mechatronic Systems. *Perspectives in Control*. 1998:237–245. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-1276-1_17 [Accessed 25th May 2019].

5. Chepchurov MS, Tyurin AV, Zhukov EM. Getting flat surfaces in turning. *World Applied Sciences Journal*. 2014;30(10):1208–1213.

6. Chepchurov MS, Tyurin AV. Performing flats on automatic lathes. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2013;11:14–16. (In Russ.)

7. Chepchurov MS, Tyurin AV. Technological systems based on Swiss screw machines using modular equipment layout. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2013;7:64–69. (In Russ.)

8. Pelipenko NA. Mathematical model of cylindrical surface formation under frameless technology of large part processing. *Vestnik Mashinostroeniya*. 1988;5:40–41. (In Russ.)

9. Pelipenko NA, Sanin SN. Position determination of gage length in basing and rotating of elliptical bandage.

Tyazheloe mashinostroenie. 2014;1:32–36. (In Russ.)

10. Chepchurov MS, Pogonin DA, Starostin SV. Determination of optimal technological parameters of impact turning. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya* = *Repair, Reconditioning, Modernization*. 2010;10:9–11. (In Russ.)

11. Chepchurov MS, Tabekina NA. Reduction of time expenditure under part production by Swiss-type automatic lathes with sorting devices. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;6:64–72. (In Russ.)

12. Dudukalo DV, Sumskoj AM On determination of rotating, rolling body center deviation. *Materialy X Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem* = *Proceedings of X International youth forum with international participation*. 1–15 October 2018, Belgorod. Belgorod: Belgorod State Technological University; 2018, p. 1788–1793. (In Russ.)

13. Manos NP, Bedi S, Miller D, Mann S. Single controlled axis lathe mill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007;32:55–65.

14. Li Qiang, Ai Wu, Chen Bing. Variable angle compensation control of noncircular turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;70:735–746. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5286-1>

15. Chepchurov MS, Zhukov EM, Bludov AN. *Methods of projection estimation of object geometry in mechanical engineering and their implementation*. Belgorod: Belgorod State Technological University; 2015, 149 p. (In Russ.)

16. Kunvu Li. *CAD basics. SAPR CAD/CAM/CAE*. Saint-Petersburg: Piter; 2004, 560 p. (In Russ.)

17. Andrievskij BR, Fradkov AL. *Selected chapters of the automatic control theory with examples in MATLAB*. Saint-Petersburg: Nauka; 1999, 475 p. (In Russ.)

18. Gromov YY, Ivanova OG, Alekseev VV, Ivanovskij

MA, Shvec DP. *Special sections of the control theory. Optimal control of dynamic systems.* Tambov: Tambov State Technical University; 2012, 108 p. (In Russ.)

19. Bekasov DL, Voronov VN. Method for calculating basic geometric parameters of non-circular profiles pro-

Критерии авторства

Дудукало Д.В., Чепчуров М.С., Вагнер М.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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дудукало Денис Васильевич,

аспирант,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия;
✉ e-mail: denis.dudukalo@yandex.ru

Чепчуров Михаил Сергеевич,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия;
e-mail: avt.post@mail.ru

Вагнер Максим Юрьевич,

кандидат технических наук,
заместитель начальника сортопрокатного цеха,
ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат»,
309454, г. Старый Оскол, ул. Алексея Угарова, 218,
Россия;
e-mail: vagner76@yandex.ru

cessed by turn-milling. *Tekhnologiya mashinostroeniya.* 2008;4:16–17. (In Russ.)

20. Bekasov D.L. Turn-milling of non-circular profiles with a longitudinal feed. *Tekhnologiya mashinostroeniya.* 2008;3:9–10. (In Russ.)

Authorship criteria

Dudukalo D.V., Chepchurov M.S., Vagner M.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.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis V. Dudukalo,

Postgraduate Student,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46 Kostyukov St., Belgorod 308012, Russia;
✉ e-mail: denis.dudukalo@yandex.ru

Mikhail S. Chepchurov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46 Kostyukov St., Belgorod 308012, Russia;
e-mail: avt.post@mail.ru

Maxim Yu. Vagner,

Cand. Sci. (Eng.),
Deputy Head of the Long Product Rolling Mill,
Oskol Electrometallurgical Plant OJSC,
218 Aleksey Ugarov St., Staryi Oskol 309454, Russia;
e-mail: vagner76@yandex.ru



Original article / Оригинальная статья

УДК 621.512

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-262-274>

Developing installation to increase cylindrical part surface hardness

© Semen A. Zaides*, Vu Van Huy**, Doan Thanh Van**

*National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia

**Vietnam-Russia Tropical center, Ho Chi Minh, Vietnam

Abstract: The aim of the study is to develop an installation for increasing the hardness of the surface layer of cylindrical low-carbon steel components. An argon-arc welding apparatus was used as a plasma-arc source. The movements of the burner and the workpieces are provided by a numerical control to perform specific operations according to preprogrammed commands, i.e. the unit operates during a work cycle according to a specially-designed program without operator intervention. Thus, the setup is designed for processing parts having complex geometric shapes to a given tolerance. For carburisation, a paste composed of graphite, sodium silicate (waterglass) and water was used. The waterglass is dissolved in water; then, after drying, a colloidal solution is formed with graphite powder. The layout of the installation was elaborated and the main components were selected. The installation comprises the following components: a personal computer for process control; a TIG 250P power source; a plasma arc source; guides fitted with mechanisms for ensuring the movement of tables and burners located on them; a table for affixing flat workpieces; a table equipped with a jaw chuck for securing and rotating cylindrical workpieces. The personal computer used to control the entire process of increasing hardness comprises a key element in the operation of the installation. The results of the study of workpiece samples following processing by means of the designed installation are presented. The installation provides a controlled process for heating the surface layer of a metal workpiece. A light-grey layer of increased hardness is observed on the surface of the hardened metal. The hardness of this layer achieves up to 50–55 HRC, while the roughness is in the range of 3–10 microns. Due to the high accuracy of the plasma carburisation process automated by means of the developed installation, it is possible to significantly reduce the carburisation time and ensure uniform quality properties of the carburised layers.

Keywords: surface hardening, plasma heating, carburizing paste, macrohardness, microhardness, plasma carburisation process

Information about the article: Received February 20, 2020; accepted for publication March 24, 2019; available online April 30, 2020.

For citation: Zaides SA, Vu Van Huy, Doan Thanh Van. Developing installation to increase cylindrical part surface hardness. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):262–274. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-262-274>

Разработка установки для повышения поверхностной твердости цилиндрических деталей

С.А. Зайдес*, Ву Ван Гюи**, Доан Тхань Ван**

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

**Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр, г. Хошимин, Вьетнам

Резюме: Цель – разработка установки для повышения твердости поверхностного слоя цилиндрических деталей из низкоуглеродистых сталей. В качестве источника плазменной дуги использован аппарат аргонодуговой сварки. Движения горелки и детали обеспечиваются числовым программным управлением, позволяющим выполнять определенные операции по командам, т.е. установка работает по режимам специально созданной программы в течение рабочего цикла без вмешательства оператора. Поэтому данная установка позволяет обрабатывать детали сложной геометрической формы с заданной точностью. Для осуществления цементации использовали пасту следующего состава: графит, жидкое стекло, вода. Жидкое стекло растворяется в воде, и после сушки образуется коллоидный раствор с порошком графита. Была разработана компоновка установки и выбраны основные узлы. Установка состоит из: персонального компьютера для управления процессом; источника питания TIG 250P; источника плазменной дуги; направляющих, с расположенными на них механизмами обеспечения движения столов и горелки; стола для закрепления плоской детали; стола, снабженного кулачковым патроном для закрепления и вращения цилиндрической детали. Важным элементом в работе на установке является ПК персональный

компьютер, контролирующий весь технологический процесс повышения твердости. Приведены результаты исследования образцов после обработки на спроектированной установке. Установка обеспечивает контролируемый процесс нагрева поверхностного слоя металла. На поверхности упрочненного металла наблюдается темный слой повышенной твердости. Твердость данного слоя достигается до 50–55 HRC, шероховатость находится в пределах 3–10 мкм. Разработанная установка позволяет автоматизировать процесс плазменной цементации с высокой точностью, следовательно, можно значительно сократить время цементации и обеспечить равномерное качество свойств цементируемых слоев.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, плазменный нагрев, паста, макротвердость, микротвердость, процесс плазменной цементации

Информация о статье: Дата поступления 20 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 24 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Зайдес С.А., Ву Ван Гюи, Доан Тхань Ван. Разработка установки для повышения поверхностной твердости цилиндрических деталей. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 262–274. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-262-274>

1. INTRODUCTION

Effecting an increase in the superficial hardness of metals is widely used in various industries to improve the wear resistance of steel parts such as gears, shafts, mill rolls, dies, etc. This is generally achieved by converting the structure of the surface layer of steel from austenite to martensite by heating it above the phase transformation temperature, followed by rapid cooling of the heated metal layer by means of thermal conductivity or the use of various cooling media.

The process is typically carried out using a plasma arc, a laser beam, an electron beam or a gas flame [1–5]. The first attempts to use cold plasma to accelerate the transfer of carbon during carburisation date back to the 1970s [5]. The 1980s were marked by major developments in this process along with the first industrial applications, while the next decade marked the widespread introduction of this technology into various industries. Plasma carburisation offers a promising alternative for increasing hardness and wear resistance [6, 7]. This consists of a thermochemical process [1, 8] applied to accelerate the diffusion of carbon through the surface layer of a metal. At high temperatures, carbon exhibits maximum solubility in the stable austenite equilibrium phase. Carbonised surface layers contain 0.8 and 1.0 wt.% carbon. Following diffusion saturation of the surface layer, cooling is necessary for carbon fixation. Subsequently, the surface carbon-saturated metal layer is reheated to austenitisation temperature and then rapidly

cooled to obtain a martensitic structure having a high degree of hardness. The content of the carbon gradient in the surface layer determines the hardness distribution over the depth of the surface layer, increasing its wear-resistance [5–7]. Plasma carburisation is among preferred alternative procedures for various reasons, including the possibility of its operation in an oxygen-free atmosphere [8]. In this case, active carbon can be formed directly by the ionising effect of the plasma. Therefore, more uniform carburisation throughout the depth of the surface layer of the metal can be accurately controlled by varying flame formation parameters [9–11]. In addition, the fatigue properties of products are improved due to the absence of oxides forming at grain boundaries [8]. The temperature- and time-dependent diffusion process of plasma carburisation follows the square root of the time relation [9, 12–14]. Therefore, it is evident that the results of low-temperature and high-temperature plasma carburisation will depend on the processing time. A known vacuum process uses glow discharge technology to introduce active soluble carbon onto a steel surface for its subsequent diffusion, leading to a greater depth of carburisation than with traditional gas carburisation approaches [8, 9]. On the other hand, despite the higher temperatures that allow plasma carburisation, the control of high temperature and sample geometry is limited by plasma-based methods, especially for industrial applications. Thus, many studies are focused on low-temperature plasma carburisation processes, as well as their effect



on increasing the hardness of various steels [4, 5, 7, 8, 15, 16]. Most studies emphasise the mechanical and tribocorrosion properties of low-carbon steels obtained through carburisation processes carried out at low temperatures. Nevertheless, there are several studies in which the evolution of the microstructure following a plasma carburisation process carried out at a high temperature and over a long period of time was described. So, for example, in [5–7] a coating composition (graphite, waterglass, water, oil for cutting fluid) was considered for applying various parts of machines and tools to the surface, which allows the surface of the metal to be saturated with carbon without reflow and with surface reflow [2–5]. Recent works by various authors [4, 5, 7, 17–19] demonstrate the potential of plasma-arc carburisation of steel products. At the same time, the number of works devoted to comparing actual industrial plants used for plasma-arc carburisation to their laser and electron-beam processing counterparts, is insignificant [16].

During the 1940s in the USSR, a test was conducted on the use of a welding arc obtained via a graphite electrode for the surface hardening of steel [17]. Although the use of an alternating field to produce an oscillating arc prevents the surface from melting [2], this technology was not industrially implemented due to the significant accumulation of heat in the treated workpiece. An approach for the automation of an argon-arc welding process used in the USA involved a continuous supply of additional metal (powder) to the arc [18, 19]. During the 1980s, plasma devices started to become widely used in industry for welding, cutting, spraying and hardening parts such as mine equipment and automobile camshafts [19–21]. Equipment for arc welding in an inert gas medium with a non-consumable tungsten electrode can also be used to produce a plasma arc [20]. Although relatively simple and widely available, the use of this type of equipment for surface treatments (quenching, carburisation) is limited due to plasma arcs obtained in this way having a small heating spot, resulting in a very narrow hardened track (~5–8 mm). The use of a magnetic field to perform oscillations of the arc, expanding the

track width to 15–20 mm is described in the works [2, 7, 17–20]. It should be noted that an arc generated from plasma arc welding equipment (direct arc) is highly sensitive to changes in the parameters of the combustion mode on the metal surface. As a result, the process of surface hardening without melting easily deviates from the optimal mode during manual hardening, causing fusion of the surface, which is unacceptable according to the principles of classical surface hardening. Thus, in order to eliminate this phenomenon, it is necessary to automate the process of hardening machine parts and tools.

The aim of the present work is to develop an apparatus for automating a selective surface carburisation (hardening) process using a graphite coating and an electric (plasma) arc as used in the TIG welding process.

2. MATERIALS AND METHODS

An argon-arc welding apparatus was used for forming a plasma arc. Here, the movements of the burner and the parts are provided by a computer numerical control (CNC) to perform specific operations according to the commands, i.e. the unit functions during a work cycle according to a specially-designed program without operator intervention. Thus, the setup is designed for the to a high-tolerance processing of workpieces having complex geometric shapes.

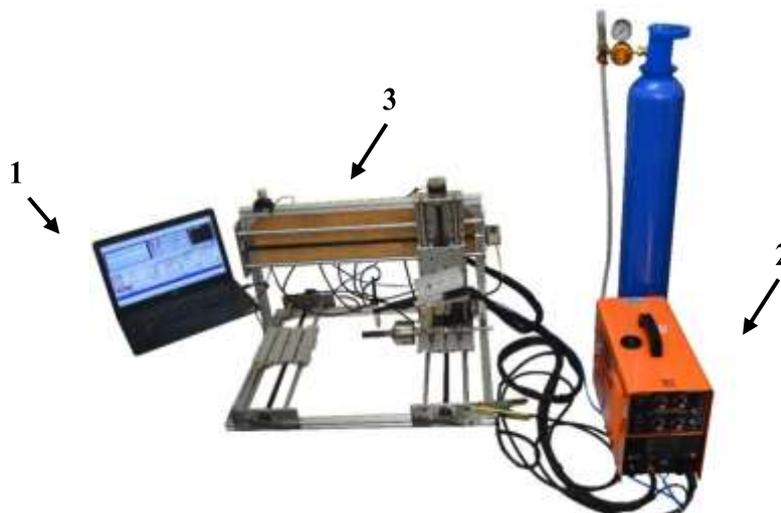
The plasma carburisation process was carried out by applying to the samples a hard coating having the following composition: graphite, waterglass, water. After dissolving the waterglass in water and subsequent drying, a colloidal solution is formed with graphite powder. The composition of the graphite, waterglass and water coating paste is described in detail in [5–7]. Due to its high electrical conductivity, the use of graphite as the main saturating component makes it possible to reduce the electrical resistance at the interface between the contact between the heating spots of the plasma arc and the coating. The mechanical strength of the coating is achieved by the use of a waterglass-based adhesive mass as a binder. The experiments reported in [5, 7,

13, 14] showed that a solution consisting of 40% waterglass, 30% graphite and 30% water provides the best adhesion of the graphite coating (before drying) to the surface of cylindrical workpieces. The order of preparation of the paste was as follows: a fine-grained form of the powder was combined to form an even mixture. The pastes were made by mixing the mixture of powders in silicate cement at a volume ratio of 1:1. The resulting paste was applied with a thickness of about 1 mm onto the cylindrical surface of the workpiece samples. Following plasma processing, samples were cut on a Polilab P100A automatic cutting machine. A Polilab C50A press was used to fabricate the metallographic sections. For polishing the surface of microsections, a Polilab P12M grinding and polishing machine was used. Prior to carrying out the microstructure examination, the samples were etched in 5% nitric acid. The microstructure was observed using a Micromed MET-2 optical microscope (Russia) and a JEOL JIB-4501 scanning electron microscope (Japan). Microhardness was measured using a Lonroy HBRV-187.5 (China) and Emcotest DuraScan G5 series hardness tester (Germany).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Based on the analysis of literary sources [1–22], the schematic configuration was determined and the main units of the in-

stallation were selected. The installation (Fig. 1, 2) consists of: a personal computer (PC) (1) for controlling the process; a TIG 250P (2) – power source; a plasma arc source; guides (3) fitted with mechanisms for ensuring the movement of tables and burners located on them (4); a table (5) for affixing flat workpieces; a table (6) equipped with a K80 jaw chuck (7) for securing and rotating cylindrical workpieces. An important element in the operation of the installation is the PC (1), which provides the signals for the installation commands and supports the uninterrupted operation of the equipment. The computer (1) is installed with the Mach 3 software package, comprising an economical installation management station. The Mach 3 software runs on a PC with a Windows 2000, Windows XP, or Windows 7 32-bit operating system. The developers of the program recommend using a computer with a processor of 1 GHz or more and at least 1 Gb of RAM. The TIG-250P welding source is a commercially-available inverter power source designed for argon-arc welding of materials such as stainless-, carbon- and alloy-steels, aluminium, alloys of titanium, nickel, copper, brass, etc, using a non-consumable tungsten electrode. The frame (3) of the installation (Fig. 2) is made of seamless aluminium profile (wall cross section 30 mm). The reinforced profile of the frame allows it to withstand heavy loads, while maintaining reliability and structural rigidity.



**Fig. 1. Configuration of plasma surface hardening installation
Рис. 1. Комплектация установки для плазменного поверхностного упрочнения**



The movement of the burner (4) (see Fig. 2) in forward, backward, right, left, up and down directions relative to the tables (5, 6), according to the coordinate system (X, Y, Z), is performed using leadscrew actuators (8, 9, 10), consisting of a screw having a diameter of 12 mm, two screw brackets, a GFD-12 nut holder and R12-5T4-FSI nuts. The use of these leadscrews eliminates play when moving coordinates, providing high precision processing and positioning, as well as smoothness and good wear resistance. The rotation of the K80 type cam chuck is provided by a toothed belt drive (11), consisting of a driving

pulley, driven pulleys and a belt having a width of 10 mm. To move along the axes, 57x42 stepper motors having a step of 0.8-1.8 degrees with a rotation moment of 3 nm are used, allowing the manipulation of workpieces with a weight of up to 15 kg. The main advantage of stepper motors consists in their accuracy and low cost. Tables (5), (6) are used to fasten the workpieces for processing on the installation. The T-shaped grooves in the aluminium table allow the workpiece to be attached using clamps in any working area. Installation parameters are given in the table.

Main technical parameters of the installation
Основные технические параметры установки

Axis travel XxYxZ (mm)	750x550x300
Table size, XxY (mm)	200x200; 200x300
Overall dimensions of the machine, XxYxZ (mm)	800x600x600
Frame	seamless aluminium profile
Table type	grooved aluminium table
Control system	Mach 3
Free movement on axes X, Y, Z (mm/min)	1500
X, Y, Z axis guides	Leadscrew actuators
A axis guides	Toothed belt drive
Drive type	stepper motors
Operating system	Windows XP / 7 (32)
Power Source	220V ~ 50 Hz

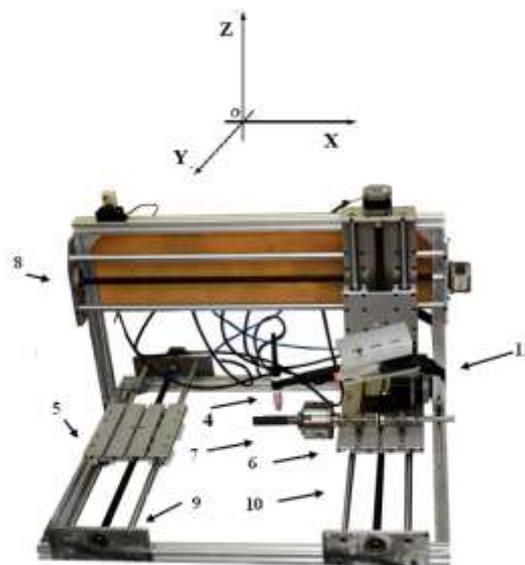


Fig. 2. View of movement and rotation mechanisms of a plasma hardening installation
Рис. 2. Внешний вид механизмов перемещения и вращения установки для плазменного упрочнения

Installation operation procedure:

1. A "computer numerical control" is created. The CNC, generally presented in the form of a G-code file, contains a set of commands by which surface cementation will be performed. The G-code language comprises two groups of commands: G-commands and M-commands. G-commands specify the coordinate system and working plane, as well as the origin and type of movement (accelerated, working), the type of motion trajectory (linear, circular), positioning coordinates, cartridge rotation speed and processing speed. A group of auxiliary commands referred to as M-commands are used to turn the plasma arc on and off. G-code control programs can be compiled manually or by using computer-aided design CAD/CAM application.

2. The CNC file is then transferred to the installation control program (in this case, Mach 3).

3. The control program reads the CNC, translates it into a language that the installation control system understands and uses the information to control the tool that processes the workpiece with a graphite coating. The Mach 3 program, which runs on a PC, sends the signals to the drive cards (controllers).

4. The signals from the control program are amplified by the axle drive circuit boards in such a way that they are supplied with power and an appropriate duration to control the motors mounted on the machine axes.

5. Movement along the machine axes is carried out using helical (X, Y, Z axis) and belt (axis A) gears, whose rotation is transmitted from stepper motors.

An example of a control program for carburising a cylinder having a diameter of 10 mm is given below.

G0 Y0 (accelerated movement of the burner to position Y0)

G0 X0 (accelerated movement of the burner to position X0)

G0 Z3 (accelerated movement of the burner to position Z3 – with a distance between the electrode and the surface of the workpiece of 3 mm)

M3 (Actuation of plasma arc)

G91 (assignment of relative

positioning)

G1 A355 F2800 (rotation of workpiece by 355° at a speed of 2800 deg/min)

G1 X2 F1000 (movement of the burner 2 mm along the axis O X)

G1 A355 F2800 (rotation of workpiece by 355° at a speed of 2800 deg/min)

.....

G1 A350 F2800 (rotation of workpiece by 355° at a speed of 200 mm/min)

G1 X4 F1000 (movement of the burner 2 mm along the OX axis)

M5 (Deactuation of the plasma arc)

G90 (assignment of absolute positioning)

G0 Z20 (burner raised by 20 mm along the OZ axis)

G0 X0 Y0 (movement of the burner at X = 0 Y = 0)

M30 (Process shutdown)

The workpiece in the form of a cylinder rotates at a speed of 2800 rpm; the burner can move in the range of 0.5–2 mm per revolution. An important condition for the movement of the burner consists in the diameter of the heating spot and the length of the cylinder [2]. This fact must be considered when setting the hardening rate. The practical part is as follows: following mixing, the solution is stirred with an AREX / F20520163 heating magnetic stirrer for 15 minutes to form a colloidal solution. Samples are immersed in the resulting solution (held for 5 s and rotated through 360°), removed and placed in a JP Selecta 2000367 furnace, heated to a temperature of 50°C, for 1 h. Following this stage, graphite from the solution is firmly adhered to the surface of the samples. Coating by this method ensures uniform thickness along the sample length. Coating thickness is measured along the length of the samples using a Defelsko Positector 6000 FNS coating thickness gauge.

Initially, an operation was carried out to control the plasma carburisation process on rectangular test pieces. A hard coating with a different carbon content was applied to the surface of these samples. Hardness measurements were carried out on the upper part of the control sample (surface open to the plasma), as well as on the lower part (surface not



exposed to the plasma). Following low-temperature plasma carburisation, a significant increase in the hardness of the material as when comparing the values measured at the top of the sample (carbonised) with those measured at the bottom (untreated). A change in the carbon content in the hard coating in the range from 0.25% to 1.00% led to a slight increase in the hardness of the upper surface of the sample from 589 to 638 HV_{0.3}. On the other hand, an average value of 375 HV_{0.3} was obtained on the lower surface as a result of the tempering effect from heating the sample during processing. These values are very similar to those obtained for other samples in [2–5], which can be attributed to the carburisation effect, since the upper part is exposed to the physicochemical plasma environment. In contrast, where it came into contact with the holder, the lower surface of the sample showed a significant decrease in hardness due to a lack of interaction with the plasma medium. It is well-known [5, 8] that it is necessary to carry out tempering immediately following quenching in order to reduce the residual stresses caused by the martensitic transformation. In the present work, carburisation, leading to an increase in hardness, is carried out simultaneously with hardening. At the same time, due to the accumulation of heat and consequent decrease in hardness, a tempering effect is possible. Since they are thermally activated, both effects are directly dependent on the processing temperature. The increase in hardness may be due to the formation of carbide or even to the obtaining of other phases. In the converse case, the decrease in hardness will be associated with the martensite tempering effect. The above results clearly indicate that low-temperature carburisation is effective for surface hardening, with no martensite tempering. The carburisation rate – and, consequently, the hardness of martensite – is affected by various processing parameters, including voltage, the distance between arc source and samples, arc current, as well as the time of the carburisation process [5, 7].

Fig. 3 shows the change in coating thickness along the length of the workpiece during testing of the installation. When using a

coating with 40% waterglass, it can be seen that the thickness is in the range of 104–112 μm; following processing, no surface fusion was detected. After that, the samples are subjected to plasma treatment at a plasma arc current of 90 A, an arc length of 3 mm and an argon flow rate of 5 l/min. A visual representation of the processing process is shown in Fig. 4.

Fig. 5 shows the appearance of the cylindrical part before processing (right side) and after processing (left side). A dark white layer of increased hardness can be observed on the surface of the coated part following plasma heating. The hardness of this layer reaches 50–55 HRC, which agrees with the figures in [2–4, 7, 14, 21], while the roughness is in the range of 3–10 microns [24].

It was determined that the thickness of the carbonised layers increases with increasing arc source current. From this it follows that high arc currents lead to the formation of a high-density plasma, involving significant flows of active particles that bombard the surface of the sample, and, consequently, to the rapid formation of carbonised surface layers. With increasing distance between the arc source and samples, the thickness of the carburised layers decreased. This result can be explained by the fact that greater distances result in a lower ion current, leading to a high probability of ion scattering and, consequently, to a loss of energy of the ions used to bombard carbon ions. All this will lead to a decrease in the carburisation rate. In the course of the experimental studies, it was demonstrated that the carburisation rate increases with increasing arc voltage. This can be attributed to the high fluxes of ions bombarding the surface of the samples resulting in the deposition of carbon particles. In addition, intense ion bombardment will lead to a high density of structural defects on the surface of the sample and, consequently, to the creation of channels for the rapid diffusion of carbon atoms into the steel. At the same time, carbon diffusion also accelerates with increasing temperature.

Fig. 6 shows the microstructures and distribution of microhardness along the width of the hardening zone in the mode without surface melting at a degree of overlap of the

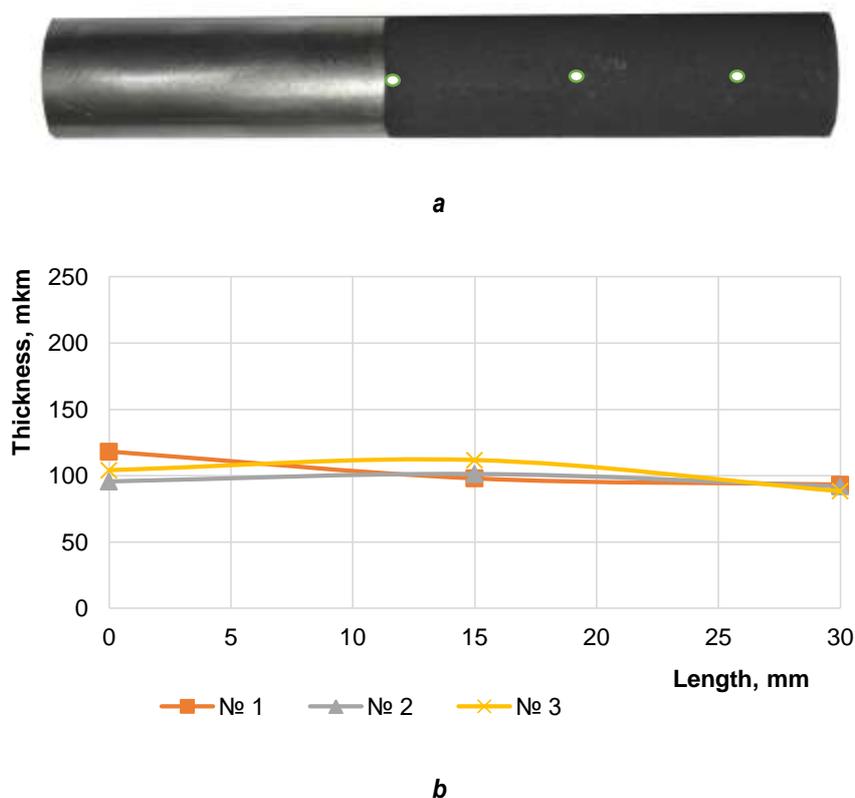


Fig. 3. Results of cylindrical sample coating (40% – waterglass, 30% – graphite, 30% – water): a – sample after drying; b – coating thickness distribution along the length of the cylindrical surface
Рис. 3. Результаты покрытия цилиндрического образца (40% – жидкое стекло, 30% – графит, 30% – вода): а – образец после сушки; б – распределение толщины покрытия по длине цилиндрической поверхности

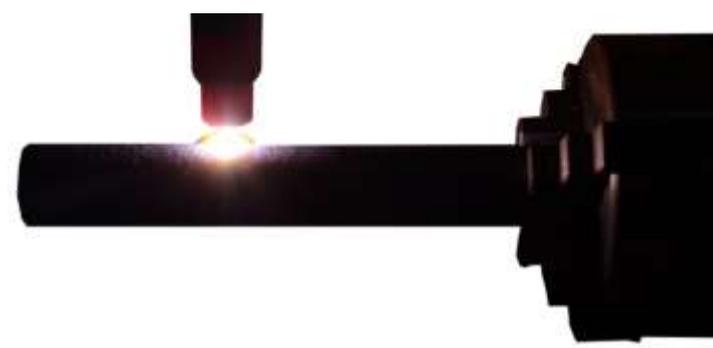
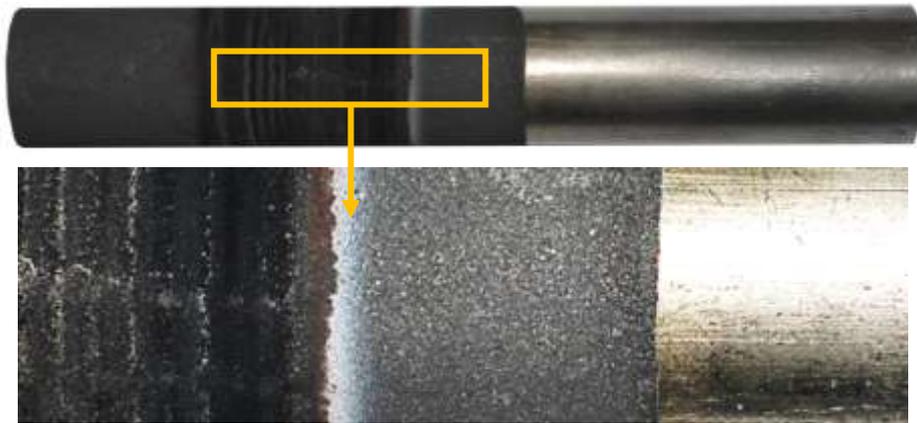


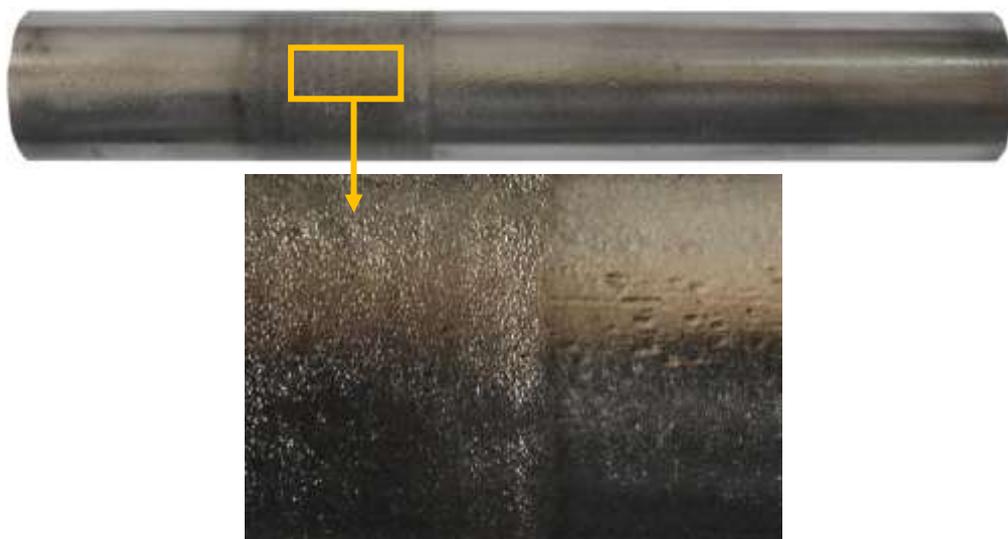
Fig. 4. Plasma treatment on the installation
Рис. 4. Процесс плазменной обработки на установке

hardened tracks of 25%. The structure of the carburisation zone of the surface layer is presented: ledeburite + residual austenite + martensite (up to the overlap zone) and martensite and residual austenite in the overlap zone. Microhardness was measured to a depth of 30 µm from the surface. It can be seen that the distribution of microhardness is relatively uniform, without significant cavities, as indicated in [2–4].

A thin and continuous carbon-rich surface layer was obtained for all experimental conditions. The results show that the outer layer becomes thicker with increasing carbon content in the hard coating. It can also be noted that carbon diffusion in the bulk material does not appear to cause significant microstructural modifications at the interface between the carbon-saturated layer and the base metal. The surface carburisation layer consists



a



b

Fig. 5. Sample after processing:
a – after plasma treatment; b – after coating removal

Рис. 5. Образец после обработки:
а – после плазменной обработки; б – после удаления покрытия

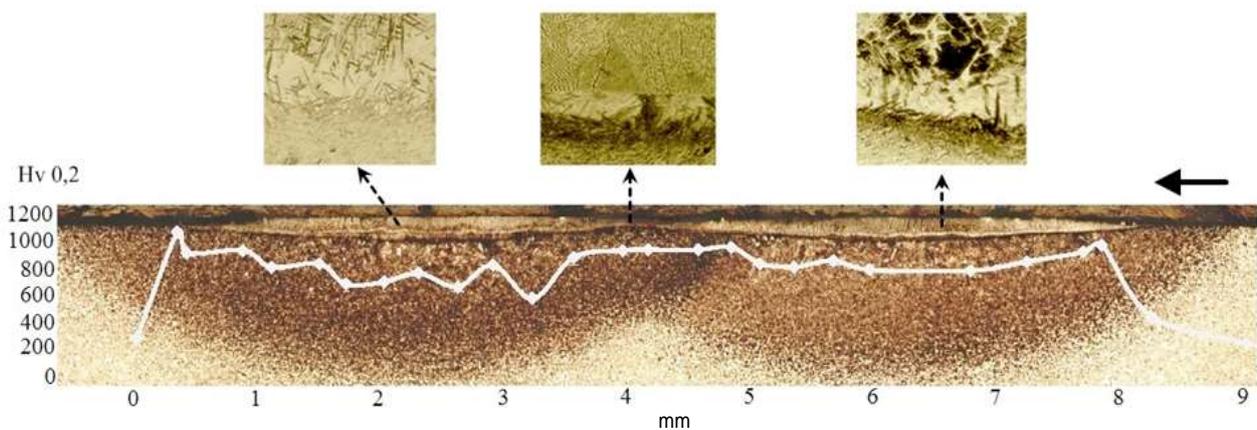


Fig. 6. Microhardness distribution at 25% overlap of hardening tracks under modes without surface melting

Рис. 6. Распределение микротвердости при 25% перекрытии дорожек упрочнения при режимах без оплавления поверхности

of a diffusion layer and a phase transformation layer. This suggests that the higher flux of atomised carbon formed by an increased plasma discharge temperature results in a higher flux of carbon impinging on the surface, while all the diffused carbon dissolves in solid solution in the diffusion layer of the surface layer of the metal. It was shown in [5] that the quantity of carbon capable of diffusing into the surface during plasma carburisation depends on the temperature and thickness of the hard coating. Therefore, the best approach for controlling this phenomenon in plasma carburisation is to transfer as much carbon as possible to the surface and maintain this high carbon flux until the carbon content on the surface reaches the solubility limit in the austenite of the steel. At the same time, it is known [2–8] that carburisation is a thermochemical diffusion process in which carbon atoms diffuse in the form of interstitials through an iron matrix, creating typical diffusion profiles depending on temperature and time. With increasing temperature, the depth of diffusion increases along with the carbon content on the surface, which reflects the increased solubility of the matrix of γ -iron for carbon. Thus, the carbon flux to the surface is dependent not only on gas and plasma, but also – significantly – on the temperature of the workpiece. This suggests that a higher diffusion flux caused by an elevated temperature leads to a higher carbon flux impinging on the surface. To date, the question remains open concerning how carbon penetrates the surface of a workpiece during plasma carburisation.

In terms of the physical process, flows of active carbon particles with high dynamic energies are used to bombard the surface of the steel, with the penetration of carbon atoms into the samples beginning at individual points and only then spreading throughout the volume of the surface layer to all surfaces (diffusion of carbon atoms will occur homogeneously within the samples). However, the detailed mechanism for this carbon transport cannot be fully described. It is known that approximately 70% of carbon particles from a graphite coating source can be ionised during an arc process [8]. The ion energy is 30–40 eV [8] depending on the voltage across the arc. Ions or

carbon particles will accelerate under voltage to the substrate (sample); intense bombardment of the surface of the sample will lead to a large number of defects on its surface. It is significant that a large number of point defects should form in the cascades of collisions, significantly increasing the diffusion of carbon atoms. It was suggested in [5, 7] that the carburisation process will begin with the formation of cementite inside the plasma column and then condense on the surfaces of the samples. Subsequent decomposition of the precipitate then becomes a source of carbon atoms [5, 7]. Some authors believe that the use of plasma will not affect the diffusion rate of carbon atoms in steel [2–4]. However, due to a high rate of transfer of carbon particles in the plasma leading to a rapid increase in the concentration of carbon on the surface, carbon diffusion will begin earlier, which will lead to a reduction in processing time [5, 9].

When designing the installation, all the above theoretical aspects of the saturation of metals with carbon were considered. In particular, the introduction of automatic control over the saturation process by setting commands in the program unit allowed processing errors involving overlapping hardening tracks to be minimised.

Thus, the above-presented research results demonstrate the possibility of surface plasma carburisation using the developed installation, where the significant technological parameters are the thermal power of the plasma arc, the coefficient of overlap of the hardening tracks, the composition of the carburising paste (coating) and the cooling rate of the surface metal layer. Adjustment of technological parameters is provided by a combination of installation design parameters and the ability to automatically control them using a computer program.

4. CONCLUSION

Thus, as a result of the studies, a design for the plasma carburisation of cylindrical parts was developed and implemented. The developed installation for increasing surface hardness permits automatic control of the



technological surface hardening parameters. Plasma carburisation, in which an arc discharge plasma is used as a heating source, is more efficient than conventional processes due to the bombardment of intense energy carbon ions generated by a direct current arc discharge and accelerated by a bias voltage to the sample surface, resulting in increased carbon diffusion due to the high defect density

caused by the bombardment.

Taking cognisance of the important effect that other parameters of plasma processing can have on the properties of the treated surface, experiments were carried out in order to evaluate the effect of gas pressure and applied voltage on the plasma carburisation process in automatic mode.

References

1. Yan-hui Yang, Mao-qiu Wang, Jing-chao Chen, Han Dong. Microstructure and Mechanical Properties of Gear Steels after High Temperature Carburization. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013;20:140–145.
2. Korotkov VA, Troshin OV, Berdnikov AA. Plasma Hardening by a Scanned Arc without Surface Melting. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 1995;2:101–106. (In Russ.)
3. Chudina OV. *Combined Methods of Steel Surface Hardening using Laser Heating*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 2003, 248 p. (In Russ.)
4. Leshchinskij LK, Samotugin SS, Pirch II, Komar VI. *Plasma Surface Hardening*. Kiev: Tehnika; 1990, 109 p.
5. Balanovsky AE, Vu Van Gyui. Carburization of the Metal Surface by Plasma Surface Treatment. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2017;9:403–415. (In Russ.)
6. Korotkov VA. Wear Resistance of Plasma-Hardened Materials. *Journal of Friction and Wear*. 2011;32(1):17–22. <https://doi.org/10.3103/S1068366611010077>
7. Vu Van Huy, Balanovsky AE. Physical Principles of Plasma Surface Carburizing of Parts as Exemplified by an Antirattle Bushing of a Passenger Coach. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):10–22. (In Russ.)
8. Pout D. Surface Modification and Alloying by Laser, Ion and Electron Beams, 1987, 424 p. (Russ. ed.: *Modifitsirovanie i legirovanie poverhnosti lazernymi, ionnymi i elektronnyimi puchkami*. Moscow, Mashinostroenie, 1987, 424 p.)
9. Balanovskij AE. The Main Problems in the Theory of Plasma Surface Hardening of Metals (Review. Part 1). *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2015;12:18–30. (In Russ.)
10. Ling Tang, Jia-jie Kang, Peng-fei He, Shu-yu Ding, Shu-ying Chenc, Ming Liu, et al. Effects of Spraying Conditions on the Microstructure and Properties of NiCrBSi Coatings Prepared by Internal Rotating Plasma Spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2019; 374:625–633. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.056>
11. Korotkov VA. Plasma Hardening of Toothed and Spline Joints. *Vestnik mashinostroeniya*. 2009;8:87–89. (In Russ.)
12. Jiangwei Liu, Yan Wang, Hu Li, Costil S, Bolot R. Numerical and Experimental Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of NiCrBSi Coatings during the Plasma Spray Process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;249:471–478. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.025>
13. Petrov VS, Saakov AG. *Combustion Product Plasma in Surface Engineering*. Kiev: TOPAS; 2000, 220 p. (In Russ.)
14. Belkin PN, Yerokhin A, Kusmanov SA. Plasma Electrolytic Saturation of Steels with Nitrogen and Carbon. *Surface and Coatings Technology*. 2016;307(C):1194–1218. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.027>
15. Vu Van Huy, Balanovskiy AE. Studying Steel Surface Wear Resistance after Carbonaceous Paste-Employing Plasma Carburizing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(4):10–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-10-21>
16. Korotkov VA, Anan'ev SP, Shekurov AV. Investigation of the effect of the cooling rate on the quality of the surface layer in plasma quenching. *Welding International*. 2013;27(5):407–410. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715926>
17. Xiang Yong, Yu Deping, Li Qingtao, Peng Huabei, Cao Xiuquan, Yao Jin. Effects of thermal plasma jet heat flux characteristics on surface hardening. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;226:238–246. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.022>
18. Kulagin ID, Nikolaev AV. Arc Plasma Jet as a Source of Heat in Metal Processing. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 1959;9:1–4. (In Russ.)
19. Safonov EN. *Plasma Hardening of Machine Parts: monograph*. Nizhny Tagil: Nizhny Tagil Technological Institute (branch) Ural Federal University; 2014, 116 p. (In Russ.)
20. Korotkov VA, Makarov SV. New Surface Plasma Hardening Unit UDGZ-200 for Hardening. *Metallorabotka*. 2009;5:43–46. (In Russ.)
21. Korotkov VA, Berdnikov AA, Tolstov IA. *Parts and Tools Recovery and Hardening by Plasma Technology*. Chelyabinsk: Metall; 1993, 144 p. (In Russ.)

Библиографический список

1. Yan-hui Yang, Mao-qiu Wang, Jing-chao Chen, Han Dong. Microstructure and Mechanical Properties of Gear Steels After High Temperature Carburization // Journal of Iron and Steel Research International. 2013. No. 20. P. 140–145. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60227-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60227-7)
2. Коротков В.А., Трошин О.В., Бердников А.А. Плазменная закалка сканируемой дугой без оплавления поверхности // Физика и химия обработки материалов. 1995. № 2. С. 101–106.
3. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология. М.: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2003. 248 с.
4. Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И., Комар В.И. Плазменное поверхностное упрочнение. Киев: Техніка, 1990. 109 с.
5. Балановский А.Е., Ву Ван Гюи. Насыщение поверхности металла углеродом при плазменной поверхностной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 9. С. 403–415.
6. Korotkov V.A. Wear Resistance of Plasma-Hardened Materials // Journal of Friction and Wear. 2011. Vol. 32. Issue 1. P. 17–22. <https://doi.org/10.3103/S1068366611010077>
7. Ву Ван Гюи, Балановский А.Е. Физические основы технологии плазменной поверхностной цементации деталей на примере втулки шпинтона пассажирского вагона // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 3. С. 10–22. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-10-22>
8. Поут Д. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
9. Балановский А.Е. Основные вопросы теории плазменного поверхностного упрочнения металлов (Обзор. Часть 1) // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 12. С.18–30.
10. Ling Tang, Jia-jie Kang, Peng-fei He, Shu-yu Ding, Shu-ying Chenc, Ming Liu [et al.]. Effects of spraying conditions on the microstructure and properties of NiCrBSi coatings prepared by internal rotating plasma spraying // Surface and Coatings Technology. 2019. No. 374. P. 625–633. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.056>
11. Коротков В.А. Плазменная закалка зубчатых и шлицевых соединений // Вестник машиностроения. 2009. № 8. С. 87–89.
12. Jiangwei Liu, Yan Wang, Hu Li, Costil S., Bolot R. Numerical and experimental analysis of thermal and mechanical behavior of NiCrBSi coatings during the plasma spray process // Journal of Materials Processing Technology. 2017. No. 249. P. 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.025>
13. Петров В.С., Сааков А.Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. Киев: Изд-во «ТО-ПАС», 2000. 220 с.
14. Belkin P.N., Yerokhin A., Kusmanov S.A. Plasma Electrolytic Saturation of Steels with Nitrogen and Carbon // Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 307. Part C. P. 1194–1218. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.027>
15. Ву Ван Гюи, Балановский А.Е. Исследование износостойкости поверхности стали после плазменной цементации с использованием углеродсодержащей пасты // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4. С. 10–21. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-10-21>
16. Korotkov V.A., Anan'ev S.P., Shekurov A.V. Investigation of the effect of the cooling rate on the quality of the surface layer in plasma quenching // Welding International. 2013. Vol. 27. Issue 5. P. 407–410. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715926>
17. Xiang Yong, Yu Deping, Li Qingtao, Peng Huabei, Cao Xiuquan, Yao Jin. Effects of thermal plasma jet heat flux characteristics on surface hardening // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 226. P. 238–246. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.022>
18. Кулагин И.Д., Николаев А.В. Дуговая плазменная струя как источник теплоты при обработке металлов // Сварочное производство. 1959. № 9. С. 1–4.
19. Сафонов Е.Н. Плазменная закалка деталей машин: монография. Нижний Тагил: Изд-во НТИ (филиал) УрФУ, 2014. 116 с.
20. Коротков В.А., Макаров С.В. Новая установка УДГЗ-200 для упрочняющей обработки // Металлообработка. 2009. № 5. С. 43–46.
21. Коротков В.А., Бердников А.А., Толстов И.А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями. Челябинск: Металл, 1993. 144 с.

Authorship criteria

Zaides S.A., Vu Van Huy, Doan Thanh Van 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.

Критерии авторства

Зайдес С.А., Ву Ван Гюи, Доан Тхань Ван 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.



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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Semen A. Zaides,
Dr. Sci. (Eng), Professor,
Head of the Department of Mechanical
Engineering Technologies and Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: zsa@istu.edu

Зайдес Семен Азикович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой машиностроительных
технологий и материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия;
✉ e-mail: zsa@istu.edu

Vu Van Huy,
Cand. Sci. (Eng),
Researcher,
Vietnam-Russia Tropical center,
3, Road 3/2, District 10, Ho Chi Minh, Vietnam;
e-mail: huy241989@gmail.com

Ву Ван Гюи,
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
Российско-Вьетнамский Тропический
научно-исследовательский
и технологический центр,
г. Хошимин, 3, ул. 3/2, район 10, Вьетнам;
e-mail: huy241989@gmail.com

Doan Thanh Van,
Cand. Sci. (Eng),
Researcher,
Vietnam-Russia Tropical center,
3, Road 3/2, District 10, Ho Chi Minh, Vietnam;
e-mail: doanvan.ttdvn@gmail.com

Доан Тхань Ван,
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
Российско-Вьетнамский Тропический
научно-исследовательский
и технологический центр,
г. Хошимин, 3, ул. 3/2, район 10, Вьетнам;
e-mail: doanvan.ttdvn@gmail.com



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.98.042

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-275-283>

Выбор ширины цилиндрического лепесткового круга для револьверной головки при зачистке крупногабаритных обводообразующих деталей

© Ле Чи Винь, В.П. Кольцов, В.Б. Ракицкая, Д.А. Стародубцева

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: В авиастроении для получения необходимой формы длинномерных панелей и обшивок успешно используется технология дробеударного формообразования с последующей зачисткой лепестковым кругом, включающая в себя последовательно выполняемые операции дробеударного формообразования, зачистки и дробеударного упрочнения. Для реализации этой технологии была спроектирована и изготовлена специальная установка УДФ-4 (дробеударного формообразования – 4 вариант модернизации). Для оптимизации операции зачистки последний вариант этой установки оснащен системой числового программного управления и револьверной зачистной головкой с 4 лепестковыми кругами. Зачистка поверхностей двойной кривизны предусматривает использование как цилиндрических, так и профилированных кругов. В представленной работе рассмотрен вариант использования цилиндрических лепестковых кругов. Возможность выбора в процессе зачистки в зависимости от кривизны и ширины панели или обшивки необходимого по ширине и форме круга заметно расширили технологические возможности установки. В то же время возникла проблема выбора конкретного лепесткового круга для текущих условий обработки. Цель работы – выбор ширины цилиндрического лепесткового круга для револьверной головки при зачистке поверхностей двойной кривизны. В работе приведены результаты исследования влияния кривизны зачищаемой поверхности для четырех значений ширины круга при различной величине осадки (величина деформации круга от его прижатия к обрабатываемой поверхности). Приведены аналитические и графические зависимости связи величины осадки и кривизны панели для конкретных значений ширины выбранных кругов, позволяющие оценить возможности успешной по производительности зачистки крупногабаритных обводообразующих деталей. Исходя из приведенных данных, лепестковый круг шириной 100 мм может применяться для обработки панелей с радиусом кривизны от 2,5 м и более при любой величине осадки лепестков (от 0,5 до 3,5 мм). Круг шириной 200 мм может использоваться для обработки панелей с радиусом кривизны более 10 м в рассматриваемом диапазоне деформации лепестков, а круг шириной 300 мм – для обработки панелей с радиусом кривизны свыше 22,5 м.

Ключевые слова: крупногабаритные обводообразующие детали, зачистка, револьверная головка, лепестковый круг, деформация, выбор ширины обработки

Информация о статье: Дата поступления 27 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 09 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Ракицкая В.Б., Стародубцева Д.А. Выбор ширины цилиндрического лепесткового круга для револьверной головки при зачистке крупногабаритных обводообразующих деталей. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 275–283. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-275-283>

Selecting width of cylindrical flap wheels for turret heads when grinding large size outer-forming parts

Le Tri Vinh, Vladimir P. Koltsov, Valentina B. Rakitskaya, Daria A. Starodubtseva

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: In order to obtain the desired shape of long size panels and skins for the aerospace industry, the technology of shot peen forming with subsequent grinding with a flap wheel is successfully applied. This includes sequentially-performed operations of shot peen forming, grinding and shot hardening. In the present study, a special UDF-4 (shot peen forming equipment of the 4th version of modernisation) installation, designed and manufactured for this purpose, is described. The latest version of this installation is equipped with a numerical program control system and a turret grinding head with 4 flap wheels for optimising grinding operations. Grinding of double curvature surfaces involves the use of both

cylindrical and shaped wheels. The present paper considers the option of using cylindrical flap wheels. Depending on the curvature and width of the panel or skin under grinding, the possibility to select a wheel of desired width and shape has significantly expanded the technological capabilities of the installation. At the same time, there is a problem of selecting a specific flap wheel for the current processing conditions. The purpose of the work is to select the width of the cylindrical flap wheel for the turret head when grinding double curvature surfaces. The paper provides the research results of the influence of ground surface curvature for four values of the wheel width at the different values of hold-down (the amount of wheel deformation depending on its pressing to the machined surface). In order to evaluate the possibilities of efficient grinding of large size outer-forming parts, the analytical and graphic dependences between the values of hold-down deformation and panel curvature for specific values of the width of selected wheels are presented. According to the given data, a flap wheel of 100mm width can be used for processing panels with the curvature radius from 2.5 m or more at any value of flap hold-down (from 0.5 to 3.5 mm). A flap wheel with the width of 200 mm can be used for processing of panels having a curvature radius of more than 10 m in the considered range of flap deformation, while a flap wheel with a width of 300 mm can be used for processing panels with a curvature radius of more than 22.5.

Keywords: large size outer-forming parts, grinding, turret head, flap wheel, deformation, selection of machining width

Information about the article: Received December 27, 2019; accepted for publication March 09, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Le Tri Vinh, Koltsov VP, Rakitskaya VB, Starodubtseva DA. Selecting width of cylindrical flap wheels for turret heads when grinding large size outer-forming parts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):275–283. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-275-283>

1. ВВЕДЕНИЕ

В авиастроении для получения сложных криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок, а также операций упрочнения успешно используется разработанная в Институте авиамашиностроения и транспорта технология дробеударного формообразования и дробеударного упрочнения. Зачистка абразивным лепестковым кругом после дробеударного формообразования является обязательной частью технологического процесса изготовления длинномерных крупногабаритных поверхностей типа «панель» и «обшивка». Она проводится с целью улучшения качества исходной поверхности, сформированной отпечатками дроби [1–6]. Для реализации этой технологии в Иркутском национальном исследовательском техническом университете (ИРНИТУ) совместно с Иркутским авиационным заводом была разработана установка с числовым программным управлением (ЧПУ) модели УДФ-4.

Для повышения производительности и гибкости зачистки криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок для УДФ-4 в ИРНИТУ была разработана, изготовлена и успешно используется револьверная зачистная головка с четырьмя лепестковыми кругами шириной 100-200-300-

400 мм, соответственно [7–10]. В зависимости от кривизны и ширины обрабатываемой детали при зачистке выбирается круг необходимого размера. Помимо этого, револьверная зачистная головка (рис. 1) имеет возможность поворота корпуса относительно горизонтальной оси. Для этого она снабжена системой управления позиционированием лепесткового круга относительно поверхности панели, что позволяет поддерживать постоянное значение осадки лепестков на поверхности панели.

Поскольку лепестковый круг имеет цилиндрическую (прямого профиля) форму, при обработке поверхностей двойной кривизны деформация лепестков по периферии круга распределяется неравномерно, так наибольшая величина прижатия достигается по центру круга, минимальная по краям. Вследствие этого воздействие абразивных зерен лепестков на поверхности пятна контакта будет различным, что приводит к неравномерному съему металла по ширине обработки. На практике для обеспечения равномерного съема зачистка выполняется разделением поверхности на несколько полос обработки с перекрытием уже обработанных, что в свою очередь приводит к увеличению времени обработки [11–20].



Рис. 1. Револьверная зачистная головка для зачистки криволинейных панелей самолета на установке УДФ-4

Fig. 1. Turret grinding head for grinding curved aircraft panels on UDF-4 installation

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ ПАНЕЛИ И ШИРИНЫ ЛЕПЕСТКОВОГО КРУГА НА ДЕФОРМАЦИЮ ЛЕПЕСТКОВ КРУГА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ШИРИНЫ КРУГА ПРИ ОБРАБОТКЕ

На рис. 2 представлена условная модель взаимодействия лепесткового круга и криволинейной панели при зачистке в момент касания центральной части круга с поверхностью панели [21, 22] (на рис. 2 точкой O обозначен условный центр профиля криволинейной поверхности панели,

$OA=OB=R$ – радиус кривизны панели, $BC=t$ – наибольшая величина деформации лепестков). Для эффективного использования револьверной головки при зачистке криволинейной формы поверхности панели лепестковым кругом конкретной ширины необходимо обеспечить максимально возможный контакт круга и поверхности панели по всей ширине обработки. При этом при постоянной кривизне панели наибольшая величина съема будет наблюдаться в центральной части круга, соответствующая большей величине деформации лепестков t .

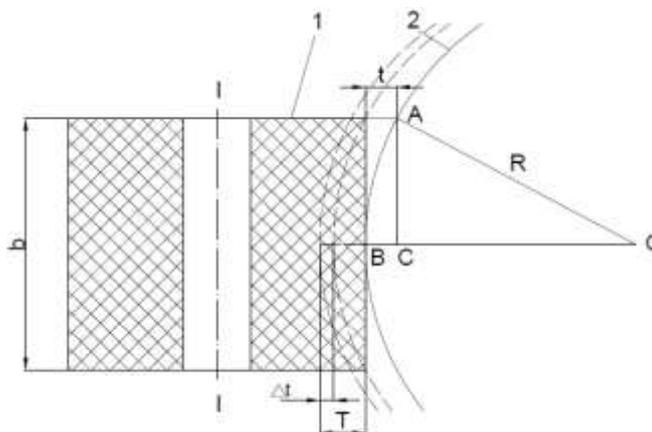


Рис. 2. Зачистка криволинейной панели лепестковым кругом: 1 – лепестковый круг; 2 – криволинейная панель; R – радиус кривизны в зоне контакта с кругом; b – ширина круга; T – максимальная величина деформации круга при полном контакте круга с поверхностью панели
Fig. 2. Grinding of curved panel with flap wheels: 1 – flap wheel; 2 – curved panel; R – curvature radius in contact zone with flap wheel; b – flap wheel width; T – maximum deformation of wheel under full contact of flap wheel and panel surface

Таким образом, для введения лепестка в обработку по всей ширине величина общей деформации лепестка T в крайних точках (точка A на рис. 2) должна быть больше высоты кривизны t на расчетную величину, т.е.

$$T = t + \Delta t, \quad (1)$$

где T – суммарная деформация лепестка в центральной части круга; Δt – минимальная деформация краевых точек лепестка, необходимая для осуществления процесса зачистки.

Из выражения (1) следует:

$$t = T - \Delta t. \quad (2)$$

На практике для осуществления зачистки значение Δt принимается технологом на основании опытных данных (минимальное значение $\Delta t = 0,5$ мм). При этом общая деформация лепестков круга (контрольный параметр в статическом состоянии круга без учета растягивания лепестка в результате воздействия центробежной силы при вращении) $1 \leq T \leq 4$ мм. Исходя из этого, $0,5 \leq t \leq 3,5$ мм.

Нетрудно заметить, что лепестковый круг должен иметь такую ширину, которая бы обеспечила обработку криволинейной поверхности панели по всей ширине круга, т.е. значение T , выбранное технологом, должно быть не более величины начальной деформации лепестков, которая требуется для снятия необходимого припуска при зачистке.

Из схемы рис. 2 следует, что максимальная величина деформации лепестка при обеспечении полного контакта по длине круга с поверхностью панели равна высоте условного сектора и зависит от радиуса кривизны панели в зоне контакта и ширины применяемого круга

$$t = R - \sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) несложно опреде-

лить значение ширины круга для обеспечения полного контакта круга с поверхностью панели с кривизной R :

$$b = 2\sqrt{2Rt - t^2}. \quad (4)$$

А также найти минимальное значение радиуса кривизны панели, которое можно обработать кругом выбранной ширины при осадке t :

$$R = \frac{1}{2t} \left(t^2 + \frac{b^2}{4} \right). \quad (5)$$

На рис. 3 представлены результаты расчетов величины деформации t , необходимой для обеспечения полного контакта по всей ширине лепестков круга с поверхностью панели в зависимости от ширины круга и радиуса кривизны панели в зоне контакта (от 4 до 40 м).

Из анализа данных, приведенных на рис. 3, следует, что если для круга шириной 100 мм радиус кривизны панели незначительно влияет на величину начальной деформации лепестков круга t , то для более широких кругов эту величину необходимо учитывать, особенно для обработки участков панели с малым радиусом кривизны. Для участков панели с радиусом кривизны менее 12 м и 20 м применять круг шириной 300 и 400 мм, соответственно, неприемлемо, т.к. в этом случае практически не наблюдается обработки по краям лепестков, что приводит к снижению производительности зачистки, неравномерному износу лепестков и снижению качества обработанной поверхности.

На рис. 4 представлены результаты расчетов зависимости величины деформации лепестков от радиуса кривизны поверхности, обеспечивающей наибольшую производительность при применении кругов различной ширины.

Из анализа полученных графических зависимостей (см. рис. 3, 4) следует, что лепестковый круг шириной 100 мм может применяться для обработки панелей с радиусом кривизны от 2,5 м и более при лю-

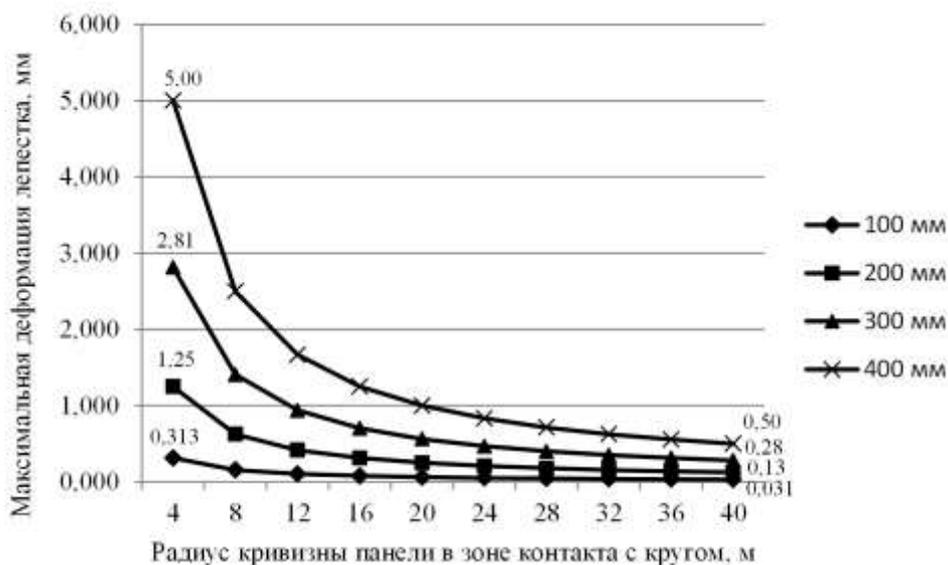


Рис. 3. Расчет величины деформации лепестков t , обеспечивающей полный контакт лепестков с поверхностью панели в зависимости от ширины круга (100, 200, 300, 400 мм) и радиуса кривизны панели в зоне контакта

Fig. 3. Calculation of flap deformation value t , which ensures full contact of flaps with panel surface depending on width of flap wheel (100, 200, 300, 400 mm) and radius of panel curvature in contact zone

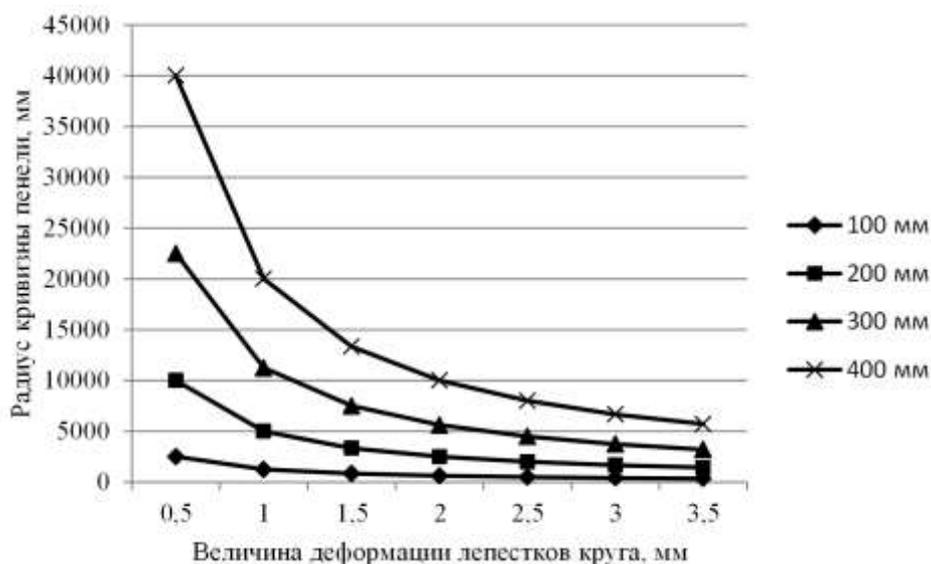


Рис. 4. Зависимость величины деформации лепесткового круга от радиуса кривизны обрабатываемой поверхности для кругов шириной 100, 200, 300, 400 мм

Fig. 4. Dependence of flap wheel deformation value on machined surface curvature radius for flap wheels with width of 100, 200, 300, 400 mm

бой величине деформации лепестков (от 0,5 до 3,5 мм). Круг шириной 200 мм может применяться для обработки панелей с радиусом кривизны более 10 м в рассматриваемом диапазоне деформации лепестков, а круг шириной 300 мм – для обработки панелей с радиусом кривизны свыше 22,5 м.

Для повышения производительности зачистки необходимо применять лепестковый круг с большей шириной. В зависимости от заданной величины деформации лепестков необходимо рассчитать минимальное значение радиуса кривизны панели в зоне зачистки.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения производительности зачистки и обеспечения качества поверхности панели следует выполнить наиболее рациональный выбор ширины лепесткового круга, при котором необходимо учитывать взаимосвязь величины начальной деформации лепестков в зоне контакта круга с поверхностью, ширину кру-

га и радиус кривизны панели в зоне контакта.

Представленная в данной работе методика расчета величины деформации лепестков в зависимости от минимального радиуса кривизны панели позволяет добиться максимальной производительности зачистки на револьверной зачистной головке, своевременно используя необходимую ширину лепесткового круга.

Библиографический список

1. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Автоматизация процесса финишной обработки после дробеударного формообразования // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред. Ю.В. Димова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 28–31.
2. Пашков А.Е., Лихачев А.А., Викулова С.В. К вопросу комплексной автоматизации процесса формообразования длинномерных листовых деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 4–3. С. 21–24.
3. Пашков А.Е. О создании комплексной технологии формообразования крупногабаритных панелей // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов: материалы Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. семинара (г. Иркутск, 9–11 ноября 2011 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. С. 103–110.
4. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Козырева М.В. Анализ зависимостей съема и шероховатости поверхности детали при обработке лепестковыми кругами по результатам факторного эксперимента // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 1. С. 32–41.
5. Koltsov V., Starodubtseva D., Le Tri Vinh, Phung Xuan Son. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels // Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference (Irkutsk, 21–26 May 2018). Irkutsk, 2018. Vol. 158. P. 386–390. <http://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.75>
6. Дубровский П.В. Исследование процессов полирования авиационных деталей // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: тезисы докладов V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Ульяновск, 24–25 ноября 2016 г.). Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2016. С. 141–142.
7. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2005. 138 с.
8. Димов Ю.В. Перспективы использования лепестковых кругов при изготовлении деталей самолета // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред. Ю.В. Димова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 3–10.
9. Стародубцева Д.А. Револьверная головка для зачистки панелей и обшивок лепестковыми кругами после дробеударного формообразования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4. С. 34–37.
10. Пат. № 2567926, Российская Федерация, В24В 29/00 (2006.01), В24В 41/04 (2006.01). Револьверная головка для шлифования криволинейных поверхностей лепестковыми кругами / А.К. Китов, А.Е. Пашков, П.Г. Гришаев, Д.А. Стародубцева; заявители и патентообладатели Иркутский национальный исследовательский технический университет, ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут». Заявл. 27.12.2013; опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31.
11. Kalchenko V.I., Sliednikova O.S., Kalchenko D.V., Muzychka D.G. 3D-модельювання інструментів та формоутворення при шліфуванні торців непереточуваних прямокутних пластин орієнтованим кругом // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2014. № 2. Р. 55–62.
12. Кальченко В.И., Следникова О.С., Кальченко Д.В. 3D-модельювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення під час шліфування зі схрещеними осями торової поверхні і круга // Технічні науки та технології. 2015. № 2. Р. 31–38.
13. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Веремей Г.А., Следникова Е.С. Модульное 3D-моделирование инструментов, процесса съема припуска и формообразования при растачивании седел клапанов ориентированной пластинкой // В і с н и к Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2015. № 2. С. 51–60.
14. Следникова О. Модульне моделювання профілів кругів, зняття припуску та формоутворення при двосторонньому шліфуванні торців некруглих деталей // Технічні науки та технології. 2016. № 3. Р. 76–84.
15. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Кологойда А.В., Кириенко С.Ю. Шлифование криволинейных поверхностей лопаток газотурбинных двигателей абразивной лентой при помощи робота с ЧПУ РМ-01 //



Вестник двигателестроения. 2012. № 1. С. 181–185.
16. Воскобойников Б.С., Гречиков М.М., Гуськова Г.И. Шлифовальные технологии и высокоточное оборудование // Комплект: инструмент, технология, оборудование. 2008. № 1. С. 12–30.
17. Николаенко А.А. Повышение производительности и точности обработки при профильном глубинном шлифовании // Вестник машиностроения. 1997. № 2. С. 21–23.
18. Носенко В.А., Жуков В.К., Васильев А.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование поверхности неполного цикла с периодической правкой круга // Вестник машиностроения. 2008. № 5. С. 44–50.
19. Рыкунов Н.С., Сухов Е.И., Волков Д.И. Высокопроизводительная обработка материалов методом глубинного шлифования // Оптимизация операций механической обработки: межвуз. сб. науч. тр. / под

ред. С.С. Силина. Ярославль: Изд-во ЯПИ, 1984. С. 23–32.
20. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
21. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Фунг Суан Шон. Производительность зачистки поверхности лепестковым кругом после дробеударного формообразования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 874–883. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883>
22. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Чапышев А.П. К определению величины припуска при зачистке поверхности панелей и обшивок лепестковым кругом после дробеударного формообразования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 25–30.

References

1. Pashkov AE, Chapyshev AP. Automation of finishing after shot peening shaping. In: Dimov YuV (eds.). *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii* = Improving efficiency of technological processes in mechanical engineering. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000, p. 28–31. (In Russ.)
2. Pashkov AE, Likhachev AA, Vikulova SV. To complex automation of long-size sheet part shaping. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2006;4–3:21–24. (In Russ.)
3. Pashkov AE. On creation of an integrated technology for large panel shaping. In: *Vysokoeffektivnyye tekhnologii proektirovaniya, konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki i izgotovleniya samoletov: materialy Vserossijskogo (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskogo seminar* = Highly effective technologies for aircraft design, engineering - technological preparation and manufacture: Materials of All-Russian (with international participation) scientific and practical seminar. 9–11 November 2011, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2011, p. 103–110. (In Russ.)
4. Koltsov VP, Starodubtseva DA, Kozyreva MV. Analysis of cuttings and part surface roughness dependences under flap wheel machining according to factorial experiment results. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2015;1:32–41. (In Russ.)
5. Koltsov V, Starodubtseva D, Le Tri Vinh, Phung Xuan Son. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels. In: *Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference. 21–26 May 2018, Irkutsk. Irkutsk; 2018, vol. 158, p. 386–390. (In Russ.)* <http://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.75>
6. Dubrovskij PV. Study of aircraft part polishing processes. In: *Sistemy upravleniya zhiznennym ciklom*

izdelij aviacionnoj tekhniki: aktual'nye problemy, issledovaniya, opyt vnedreniya i perspektivy razvitiya: doklady V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Aviation Engineering Product Life Cycle Control Systems: Actual Problems, Research, Implementation Experience and Development Prospects: Abstracts of V International scientific and practical conference 24–25 November 2016, Ulyanovsk. Ulyanovsk: Ulyanovsk State University; 2016, p. 141–142. (In Russ.)
7. Pashkov AE. *Technological connections under long sheet metal part manufacturing*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2005, 138 p. (In Russ.)
8. Dimov YuV. Application prospects of flap wheels in aircraft parts manufacturing. In: Dimov YuV (eds.). *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii* = Improving efficiency of technological processes in mechanical engineering. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000, p. 3–10. (In Russ.)
9. Starodubtseva DA. A turret for panel and cover grinding by flap wheel after shot peen forming. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie.* = Modern Technologies. System analysis. Modeling. 2015;4:34–37. (In Russ.)
10. Kitov AK, Pashkov AE, Grishaev PG, Starodubtseva DA. Turret for grinding curved surfaces with flap wheels. Patent RF, no. 2567926; 2015. (In Russ.)
11. Kalchenko VI, Sliednikova OS, Kalchenko DV, Muzychka DG. Tool 3d-modeling and forming under grinding of faces of disposable rectangular plates by the oriented wheel. *Visnik Chernigivs'kogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki* = Visnyk of Chernihiv State Technological University. 2014;2:55–62. (In Russ.)
12. Kalchenko VI, Sliednikova OS, Kalchenko DV. 3D-Modeling of tools, the process of allowance removal and shaping at grinding with crossed axes of torus surface and a wheel. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii* = Engineering Sciences and Technologies. 2015;2:31–38. (In Russ.)

13. Kalchenko VI, Kalchenko VV, Veremey GA, Slednikova ES. Modular 3D-modeling tools, the process of removing allowances and formation of valve seat oriented plate. *V i s n i k Chernigivs'kogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki* = Visnyk of Chernihiv State Technological University. 2015;2:51–60. (In Russ.)
14. Sliednikova ES. Modular modeling of wheels' profiles, stock removal and formation with bilateral grinding of ends of non-circular details. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii = Engineering Sciences and Technologies*. 2016;3:76–84. (In Russ.)
15. Kalchenko VI, Kalchenko VV, Kologoida AV, Kiri-yenko SYu. Grinding formed surface blade gas-turbine engine abrasive belt by the instrumentality NC ROBOT PM-01. *Vestnik dvigatelestroeniya*. 2012;1:181–185. (In Russ.)
16. Voskoboinikov BS, Grechikov MM, Guskova GI. Grinding technologies and high-precision equipment. *Komplekt: instrument, tekhnologiya, oborudovanie* = Complect: Tool, Technology, Equipment. 2008;1:12–30. (In Russ.)
17. Nikolaenko AA. Improving productivity and machining accuracy under profile deep grinding. *Vestnik mashinostroeniya*. 1997;2:21–23. (In Russ.)
18. Nosenko VA, Zhukov VK, Vasiliev AA, Nosenko SV.

Критерии авторства

Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Ракицкая В.Б., Стародубцева Д.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ле Чи Винь,

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

Кольцов Владимир Петрович,

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

Deep grinding of incomplete-cycle surfaces, with periodic straightening of the wheel. *Vestnik mashinostroeniya*. 2008;5:44–50. (In Russ.)

19. Rykunov NS, Sukhov EI, Volkov DI. High-performance processing of materials by deep grinding method. In: Silin SS (eds.). *Optimizaciya operacij mekhanicheskoy obrabotki* = Optimization of machining operations: interuniversity collection of scientific articles. Yaroslavl: Yaroslavl Polytechnic Institute; 1984, p. 23–32. (In Russ.)

20. Starkov VK. *Grinding with highly porous wheels*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 688 p. (In Russ.)

21. Le Tri Vinh, Koltsov VP, Starodubtseva DA, Phung Xuan Son. Productivity of flap wheel grinding after shot peening. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):874–883. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883>

22. Koltsov VP, Starodubtseva DA, Chapyshev AP. By definition, the value of the allowance during deburring abrasive mop panel surface after shot peen forming. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta imeni A.N. Tupoleva*. 2017;73(1):25–30. (In Russ.)

Authorship criteria

Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Rakitskaya V.B., Starodubtseva D.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Le Tri Vinh,

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

Vladimir P. Koltsov,

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



Ракицкая Валентина Борисовна,
старший преподаватель кафедры технологии
и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: rvb@istu.edu

Стародубцева Дарья Александровна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: d.star-irk@yandex.ru

Valentina B. Rakitskaya,
Senior Lecturer of the Department of Mechanical
Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: rvb@istu.edu

Daria A. Starodubtseva,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: d.star-irk@yandex.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 620.179.13

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-284-294>

Тепловизионный контроль многослойных изделий методами динамической тепловой томографии на базе программы «ThermoFit Pro»

© А.В. Лукьянов, А.В. Кошкин

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – обнаружение внутренних дефектов (тонкие пустоты, непроклеи, дефекты пайки и сварки) в многослойных конструкционных материалах (металлических многослойных изделиях, углепластиках, пластмассовых и тонкопленочных изделиях) с использованием современных средств тепловизионного контроля и эффективных программ обработки данных. В статье приведены результаты изучения метода динамической тепловой томографии в задачах выявления внутренних дефектов многослойных и однородных изделий. С использованием высокопроизводительного метода динамической тепловой томографии проведены исследования по обнаружению тонких внутренних дефектов в виде пустот, некачественной склейки слоев в многослойных изделиях. При проведении экспериментов использовались тепловизор FLIR E60, программная среда FLIR Tools и программное обеспечение ThermoFit Pro. Динамическая тепловая томография позволяет более точно оценивать параметры внутренних дефектов. В тепловом контроле максиграммы и таймограммы зависят от глубины и толщины дефектов и, следовательно, могут быть применены в дефектометрии. Используется одномерный алгоритм определения параметров дефектов, при котором не учитываются поперечные размеры дефектов. Алгоритм основан на комбинировании максиграмм и таймограмм. Получены результаты тепловизионного контроля в виде последовательности инфракрасных изображений. Данная последовательность обработана в программе ThermoFit Pro для получения таймограмм и максиграмм. На основании полученных результатов были сформулированы преимущества и недостатки исследуемой методики и программного обеспечения тепловизионного контроля. Метод динамической тепловой томографии может широко применяться для контроля многослойных изделий из различных материалов, в частности, в авиастроении при изготовлении и контроле композитных материалов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, тепловизионный контроль, температурный сигнал, динамическая тепловая томография, таймограмма, максиграмма

Информация о статье: Дата поступления 03 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 04 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Лукьянов А.В., Кошкин А.В. Тепловизионный контроль многослойных изделий методами динамической тепловой томографии на базе программы «ThermoFit PRO». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 284–294. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-284-294>

Use of ThermoFit PRO dynamic thermal tomography in imaging control of multilayer products

Anatoliy V. Lukyanov, Artem V. Koshkin

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract: In the present study, issues affecting the detection of internal defects, such as thin voids, adhesion failure and soldering / welding defects in multilayer construction materials, are considered. The approach involving thermal imaging control and data processing programs can be used to investigate materials including plastic and thin-film products, metallic multilayer products and carbon-fibre reinforced plastics. Results of applying the dynamic thermal tomography method to identify internal defects in both multilayer and homogeneous products are presented. The study assessed the use of the described method to detect thin internal defects in the form of voids and poor-quality gluing of layers in multilayer products. In the experiments, the FLIR E60 thermal imager and FLIR Tools software environment were used in conjunction with the ThermoFit Pro software program. Dynamic thermal tomography is acknowledged to provide for accurate evaluation of internal defect parameters. Maxigrams and timegrams used in thermal control applications are applicable in defectometry due to the dependence on the depth and thickness of the defects. In this case, a one-dimensional algorithm for determining defect parameters is used with the disregarded defect transverse dimensions. Thus, the algorithm is

based on a combination of maxigrams and timegrams. During the study, the results of thermal imaging control are obtained in the form of an infrared image sequence. This sequence was processed in the ThermoFit Pro software for both timegram and maxigram construction. Based on the results obtained, the advantages and disadvantages of the studied method, as well as the software for thermal imaging control, were formulated. The method of dynamic thermal tomography is feasible for wide application in control of various material multilayer products of such sectors of industry as the aircraft engineering, as well as the manufacture and control of composite materials.

Keywords: nondestructive control, thermal imaging control, temperature signal, dynamic thermal tomography, timegram, maxigram

Information about the article: Received February 03, 2020; accepted for publication March 04, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Lukyanov AV, Koshkin AV. Use of ThermoFit PRO dynamic thermal tomography in imaging control of multilayer products. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):284–294. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-284-294>

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более высокими становятся требования к качеству изготавливаемой промышленной продукции изделий машиностроения и своевременно выявлению их дефектов при эксплуатации. Ряд изделий представляет собой многослойные конструкции, скрепленные клеевыми или сварными соединениями. Их неправильное функционирование, вызванное наличием скрытых дефектов (непроклей, некачественная пайка или сварка, наличие пустот), стимулирует развитие различных методов неразрушающего контроля, в частности, теплового метода контроля. Разновидность теплового метода – тепловизионного – базируется на использовании современных приборов визуализации распределения тепловых полей на контролируемых изделиях¹ [1–4]. Обработкой последовательности термоизображений, а также совместной обработкой видео- и термоизображений повышается качество и достоверность теплового контроля и решаются задачи автоматизации мониторинга изделий в процессе их эксплуатации [5, 6].

Современная тепловизионная аппаратура позволяет выявлять скрытые дефекты при нормальном функционировании изделий (пассивный контроль) [7–9] и предварительном прогреве контролируемых изделий (активный тепловой контроль) [10]. Обладая высокой температурной чув-

ствительностью (до нескольких сотых долей °C), при современных методах обработки данных, тепловизоры могут выявлять геометрические характеристики (контуры, глубину залегания и толщину) скрытых дефектов металлических и неметаллических изделий. Развивающиеся методики, технологии теплового контроля и программное обеспечение обработки данных позволяют увеличить области эффективного применения этого современного метода контроля [10]. Использование тепловизионной видеосъемки с частотой 30–60 кадров в секунду и программ автоматизированной обработки термоизображений позволяет выявлять дефекты в различных цельных и многослойных изделиях, изготовленных из дерева [11], металлов [7, 12] или композитов [13–15].

В потенциально опасных зонах создаются внутренние, фиксируемые тепловизорами, деформационные источники тепла, которые позволяют контролировать трудоемкие процессы в упругой, упругопластической стадиях работы стали при зарождении и развитии разрушений [7–9]. Развиваются методики встроенных в композиты волоконно-оптических датчиков (которые в перспективе могут работать в области инфракрасного излучения) для обнаружения различных дефектов структуры и деформации композитов [16, 17]. Для современных материалов с новыми свойствами разрабатываются технологии и математические модели определения таких

¹Нестерчук Д.А. Тепловой контроль и диагностика: учеб. пособ. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 104 с.

теплофизических характеристик как теплоемкость и температуропроводность [18–20].

Основная идея томографии состоит в том, что временные интервалы появления максимальных температурных сигналов над дефектами напрямую связаны с глубиной залегания дефектов [1, 4]. В данной статье приведены результаты изучения метода динамической тепловой томографии, алгоритм которой в задачах выявления внутренних дефектов многослойных и однородных изделий был предложен В.П. Вавиловым и В.В. Ширяевым [1].

Целью исследования, предложенного в данной статье, является приложение метода динамической тепловой томографии для контроля относительно тонких дефектов типа некачественного склеивания и пустот в многослойных неметаллических изделиях. Обработка экспериментальных данных велась с использованием программного обеспечения ThermoFit Pro (Томский политехнический университет, научный руководитель разработки ПО профессор В.П. Вавилов).

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ДЕФЕКТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕПЛООВОГО СИГНАЛА

Если образец состоит из однородного материала и его тепловая инерция e постоянна во времени, то любое отклоне-

ние экспериментальных данных по тепловой инерции от ее эталонного значения можно интерпретировать как присутствие в образце зон с неоднородными теплофизическими параметрами. График изменения поверхностной температуры T от времени τ обычно отображают в логарифмических координатах " $\ln(T) - \ln(\tau)$ ". Для однородного адиабатического полубесконечного тела этот график в идеале отображается прямой линией. Фактически тепловой импульс конечной длительности, теплообмен с окружающей средой, а также толщина изделия искажают линейный вид температурной функции [10].

Для исключения негативного влияния возмущающих факторов рассматривают тепловую инерцию бездефектной зоны. Тогда для дефектных участков график отношения текущего значения тепловой инерции к эталонному значению будет отклоняться от прямой, параллельной оси времени. При этом для бездефектных участков этот график будет параллелен оси времени. На рис. 1 приведен пример экспериментальных данных.

С увеличением глубины дефекта увеличивается запаздывание нелинейного искажения рассматриваемой функции e/e_{nd} , причем уменьшается и амплитуда этого искажения. Степень развития дефекта можно описать двумя безразмерными

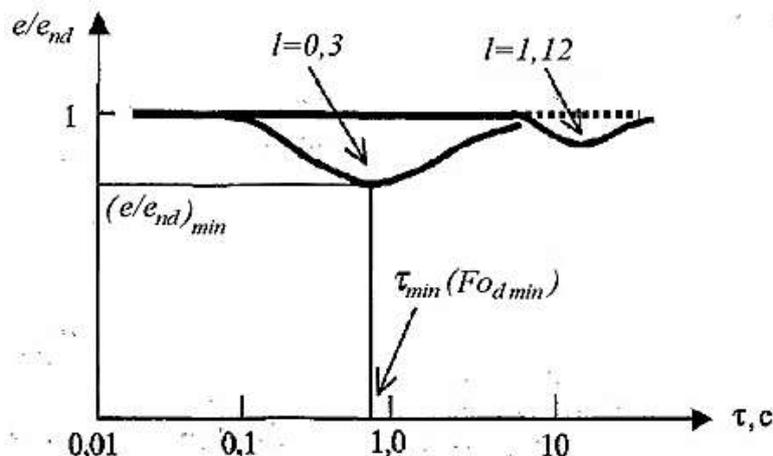


Рис. 1. Изменение отношения текущего значения тепловой инерции к эталонному
Fig. 1. Variation of thermal inertia current value vs reference value

параметрами Bi_d и Fo_d . Критерий «Био» характеризует обобщенную толщину изделия Bi_d :

$$Bi_d = \frac{l}{\lambda \cdot R_d}, \quad (1)$$

где l – глубина залегания дефекта, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); R_d – температурное сопротивление дефекта.

Число подобия Фурье характеризует течение безразмерного времени в дефектной области:

$$Fo_d = a \frac{\tau}{l^2}, \quad (2)$$

где a – температуропроводность, м²/с.

Каждому дефекту с тепловой инерцией ниже тепловой инерции основного материала на графике (рис.1) соответствует точка с координатами $(e/e_{nd})_{\min}$ и $Fo_{d\min}$, которые связаны с параметрами дефекта формулами

$$(e/e_{nd})_{\min} = Fo_{d\min}^{-0,528}; \quad (3)$$

$$Fo_{d\min} = 1 + 0,62 \cdot Bi_d^{-1}. \quad (4)$$

Формула для определения глубины

залегания дефекта будет иметь вид:

$$l = \sqrt{a \cdot \tau_{\min}} \cdot [(e/e_{nd})_{\min}]^{0,97}. \quad (5)$$

Минимум значения $(e/e_{nd})_{\min}$ соответствует максимальному температурному сигналу ΔT_m . В то же время, решение обратной задачи теплового контроля можно получить и для времени $\tau_{1/2}$, которое соответствует половине времени достижения сигнала ΔT_m .

Если для определения толщины и глубины залегания дефекта требуется получение и обработка температурного сигнала, то поперечные размеры дефектов поддаются визуальному измерению по температурным сигналам, тем более, что размеры дефектов значительно больше, чем приведенные выше два контролируемых параметра [4].

Определение геометрических размеров дефекта производится по проекции точек, соответствующих половине максимального температурного перепада $\Delta T_m / 2$. В работе [1] показано, что экстремумы производных от функции $T(x, y)$ по пространственным координатам x, y с достаточной точностью соответствуют проекциям границ скрытых дефектов на контролируемую поверхность (рис. 2).

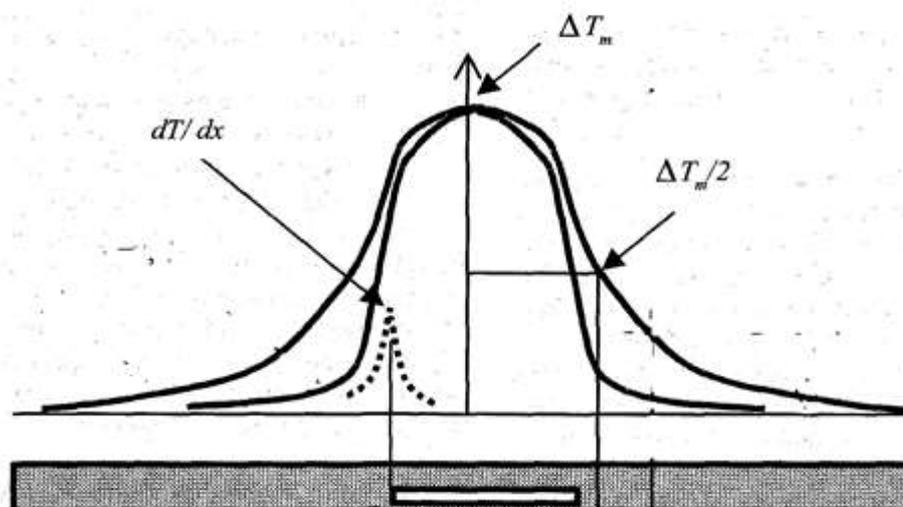


Рис. 2. Нормализованные профили температуры
 Fig. 2. Normalized temperature profiles



В большинстве практических случаев ошибка простой визуальной оценки размеров дефектов не превышает 30%.

3. ПРОЦЕСС ПОСТРОЕНИЯ ТАЙМОГРАММ И МАКСИГРАММ

Термином «тепловая томография» обозначается процедура активного теплового контроля изделия, позволяющая разделять его на отдельные слои, в пределах которых наблюдается «тепловая структура» слоя, включая дефекты. Согласно теории теплового контроля, томография возможна только в процедуре односторонних испытаний (источник нагрева и регистрирующий тепловизор находятся с одной стороны образца), где время максимального проявления структурных неоднородностей увеличивается с ростом их глубины (3), (4) в [3, 4]. Знак сигналов и положение характерных точек зависят от типа дефекта, его размеров, параметров нагрева, а также от того, какая поверхность изделия (передняя или задняя) исследуется.

Любая динамическая температурная функция может быть охарактеризована некоторыми специфическими точками. В случае теплового контроля речь идет об изменении во времени дифференциального температурного сигнала (ΔT), определен-

ного как разность температур дефектной (T_d) и бездефектной (T_{nd}) областей. В определенный момент времени τ_m , называемым «оптимальным временем наблюдения», достигается максимальное значение температурного сигнала ΔT_m .

Пары значений ΔT_m и τ_m образуют таймограммы (τ_m – изображения) и максиграммы (ΔT_m – изображения).

График процесса теплопередачи при импульсном нагреве показан на рис. 3.

Идея использования синтетических изображений, названных максиграммой и таймограммой возникла в тепловом контроле при анализе изменения во времени поверхностной температуры. Этот алгоритм требует выбора эталонной точки (i_{ref}, j_{ref}) таким образом, что все другие пиксели изображения будут проанализированы относительно нее. Как следует из теории теплового контроля, максиграммы содержат максимальные разностные температурные сигналы $\Delta T_m(i, j, \tau_m) = [T(i, j, \tau) - T(i_{ref}, j_{ref}, \tau)]_{\max}$ независимо от времени $\tau_m(i, j)$, когда они появляются в последовательности.

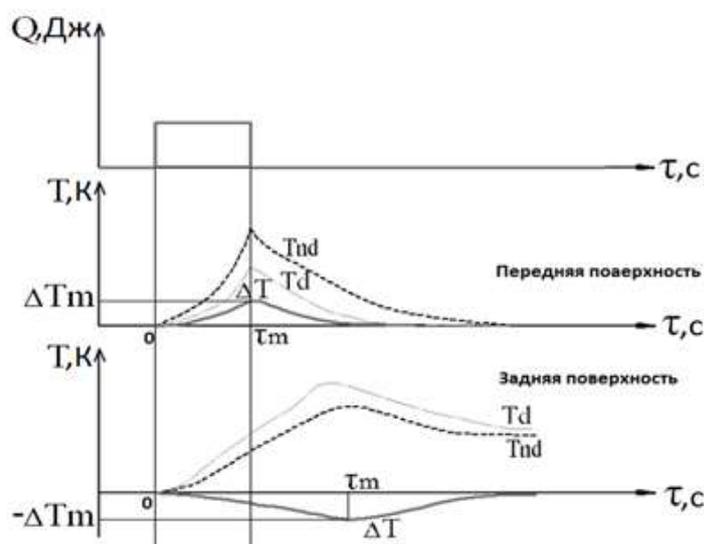


Рис. 3. Зависимость температурного сигнала от времени
Fig. 3. Temperature signal vs time

Таймограммы показывают время $\tau_m(i, j)$, когда имеют место соответствующие максимальные температурные сигналы $\Delta T_m(i, j, \tau_m)$, поэтому любая последовательность изображений может быть заменена парой синтезированных (максиграмма и таймограмма). В односторонних процедурах теплового контроля таймограммы позволяют получить глубину залегания дефекта, поэтому они часто используются для построения профилей глубины, например, в динамической тепловой томографии. Программа ThermoFit Pro позволяет применять концепцию «максиграмма – таймограмма» к любым сигналам, развивающимся во времени. Интерпретация результатов в этих случаях требует дальнейших исследований.

Программа позволяет определять глубину залегания и тепловое сопротивление (толщину) дефектов. Алгоритм определения параметров дефектов одномерный, т.е. он не принимает во внимание поперечные размеры дефектов и основан на комбинировании максиграммы и таймограммы

в следующем виде:

$$l = A_1(\alpha, L, \tau_h, \lambda_d) \cdot C_m^\beta \cdot \tau_m^\gamma; \quad (6)$$

$$R_d = A_2(\alpha, L, \tau_h, \lambda_d) \cdot C_m^\mu \cdot \tau_m^\zeta, \quad (7)$$

где l, R_d – глубина дефекта в мм и его тепловое сопротивление в $\text{м}^2\text{К}\cdot\text{Вт}^{-1}$; L – толщина изделия; τ_h – длительность нагрева; τ_m – оптимальное время наблюдения; C_m – максимальный нормализованный температурный контраст; $A_1, A_2, \beta, \gamma, \mu, \zeta$ – коэффициенты, зависящие от свойств материала и параметров процедуры контроля.

Тепловое сопротивление дефекта связано с его толщиной d выражением:

$$R_d = d / \lambda_d, \quad (8)$$

где λ_d – теплопроводность дефекта.

Принцип получения таймограмм и максиграмм показан на рис. 4.

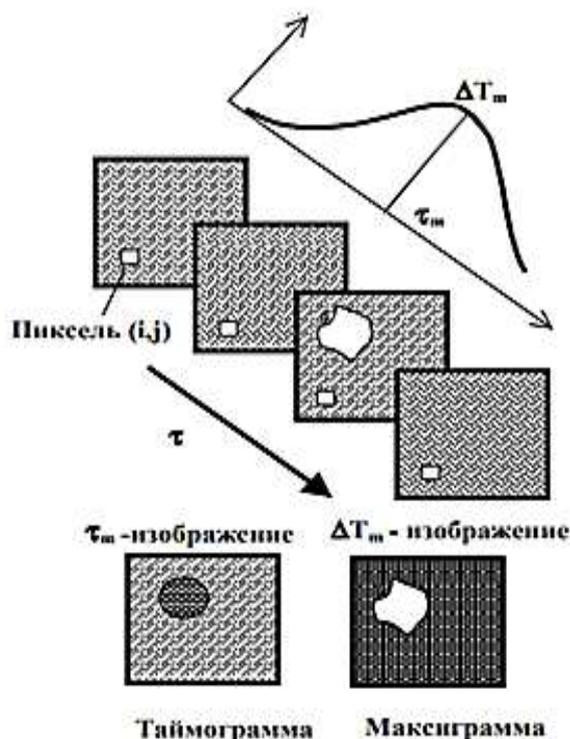


Рис. 4. Принцип получения таймограмм и максиграмм
 Fig. 4. Principle of obtaining timegrams and maxigrams



Максиграмма иллюстрирует максимумы сигналов во времени и соответствует максимальным отношениям «сигнал-шум». Тогда как таймограмма отражает последовательность оптимального времени наблюдения и соответствуют максимальным значениям температурных сигналов ΔT . В тепловом контроле максиграммы и таймограммы привязаны к глубине и толщине дефектов и, следовательно, могут быть использованы в дефектометрии.

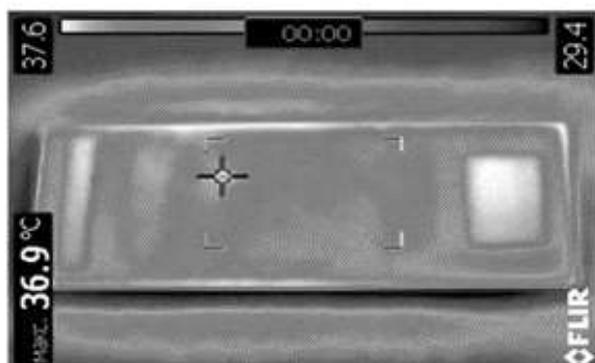
4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ ТОМОГРАФИИ

В рамках исследования производился тепловизионный контроль многослойной пластины (из поливинилхлорида) инфра-

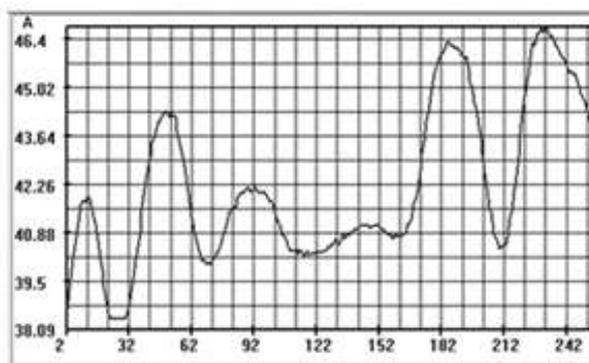
красной камерой FLIR E60. Пластина равномерно нагревалась воздушной пушкой мощностью 1,8 кВт в течение одной минуты.

Был получен набор термограмм, обработанный в программе ThermoFit Pro, меню Maxigram & Tomography. Результаты представлены на рис. 5.

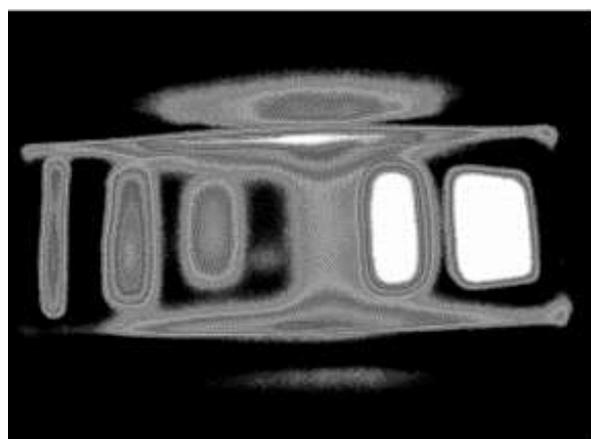
Для получения наибольшего объема информации о внутренних дефектах необходимо большое количество инфрокрасных изображений, зафиксированных при длительном наблюдении. Отличительной особенностью максиграмм и таймограмм является возможность уменьшить влияние эффекта, когда при значительной продолжительности наблюдения температура образца стремится к температуре окружающей среды, что ухудшает разрешение термограммы.



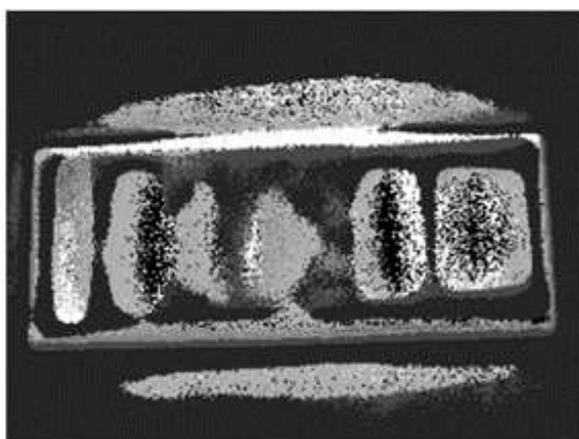
a



b



c



d

Рис. 5. Результаты динамической тепловой томографии: а – термограмма образца; б – график распределения температуры вдоль образца; с – максиграмма образца; д – таймограмма образца
Fig. 5. Results of dynamic thermal tomography: a – sample thermogram; b – graph of temperature distribution along the sample; c – sample maxigram; d – sample timegram

Приведенные на рис. 5 результаты показывают, что максиграмма и таймограмма отражают не только подповерхностные, но и глубоко залегающие дефекты (контролируемая глубина залегания пропорциональна температуре нагрева воздушной прослойки дефекта). Чем ближе к белому цвет области на рис. 5, тем выше температура дефекта относительно температуры образца, это соответствует малой глубине залегания дефекта. Чем темнее цвет области, тем ниже температура (относительно температуры образца), что соответствует более глубокому залеганию дефекта. Термограмма же показывает только подповерхностные дефекты.

График распределения температуры вдоль образца позволяет обнаруживать аномалии в виде максимумов температурного сигнала, которые вызваны дефектами. Эти неравномерности температурного сигнала несут информацию о размерах дефекта и его расположении относительно других дефектов. Процесс динамической тепловой томографии высокопроизводителен и может применяться для объектов

контроля, выполненных из большого перечня материалов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод динамической тепловой томографии на базе программного обеспечения ThermoFit Pro не требует большого количества оборудования (тепловизор и компьютер), при этом позволяет давать приблизительную оценку размеров дефектов, расположенных под поверхностью, в глубине их залегания. В отличие от метода простого тепловизионного контроля и анализа термограмм, данный метод более информативен, высокопроизводителен и нагляден при сопоставимых временных затратах на выполнение тепловизионной съемки образцов. Простота и универсальность метода динамической тепловой томографии обуславливают актуальность использования данного метода для контроля многослойных изделий из различных материалов. Широкое применение этот метод может получить в авиастроении при изготовлении и контроле композитных материалов.

Библиографический список

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Изд. дом «Спектр», 2009. 562 с.
2. Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V.P., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G.M. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection // Journal of Nondestructive Evaluation. 2016. Vol. 35. P. 18. <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0331-7>
3. Ibarra-Castaneda C., Maldague X.P. Infrared thermography // Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems. Berlin: Springer, 2013. P. 175–220. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-25850-3_10 (25.09.2019). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3>
4. Hai Zhang, Verberne P., Meguid S.A., Ibarra-Castaneda C., Maldague X.P.V. Autonomous high resolution inspection of kiss-bonds skins of carbon nanotube reinforced nanocomposites using novel dynamic line-scan thermography approach // Composites Science and Technology. 2020. Vol. 192. P. 108111. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108111>
5. Хоменко А.П., Лукьянов А.В., Капустин А.Н. Разработка алгоритмов распознавания образов по базовому изображению в задачах тепловизионного мониторинга локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2004. № 3. С. 51–58.
6. Лукьянов А.А., Капустин А.Н., Лукьянов А.В. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированного термомониторинга и диагностики оборудования // Контроль. Диагностика. 2005. № 9. С. 45–53.
7. Moiseychik E.A., Vavilov V.P. Analyzing patterns of heat generated by the tensile loading of steel rods containing discontinuity-like defects // International Journal of Damage Mechanics. 2018. Vol. 27. Issue 6. P. 950–960. <https://doi.org/10.1177/1056789517715087>
8. Moiseychik E.A., Vavilov V.P., Kuimova M.V. Infrared Thermographic Testing of Steel Structures by Using the Phenomenon of Heat Release Caused by Deformation // Journal of Nondestructive Evaluation. 2018. Vol. 37. P. 28. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0482-4>
9. Каледин В.О., Вячкин Е.С., Вячкина Е.А., Будадин О.Н., Козельская С.О. Исследование возможности теплового контроля конструкций из полимерных композиционных материалов при нагреве внутренним источником // Контроль и диагностика.



2019. № 5. С. 26–31. <https://doi.org/10.14489/td.2019.05.pp.026-031>

10. Shepard S.M., Lhota J.R., Rubadeux B.A., Wang D., Ahmed T. Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences // *Optical Engineering*. 2003. Vol. 42. Issue 5. P. 1337–1342. <https://doi.org/10.1117/1.1566969>

11. Chulkov A.O., Pradere C., Puiggali J.R., Batsale J.C., Vavilov V.P. Estimating the Humidity of Wood by Terahertz Infrared Thermography // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. Vol. 52. No. 12. P. 753–757. <https://doi.org/10.1134/S1061830916120044>

12. Cadelano G., Bortolin A., Ferrarini G., Molinas B., Giantin D., Zonta P., Bison P. Corrosion Detection in Pipelines Using Infrared Thermography: Experiments and Data Processing Methods // *Journal Nondestruct Eval*. 2016. Vol. 35. P. 49. <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0365-5>

13. Meola C., Carlomagno G.M. Impact damage in GFRP: New insights with infrared thermography // *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*. 2010. Vol. 41. Issue 12. P. 1839–1847. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.09.002>

14. Meola C., Carlomagno G.M. Monitoring Materials Under Impact with Infrared Thermography // *Thermomechanics & Infrared Imaging, Hybrid Techniques and Inverse Problems: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. 2013. Vol. 8. P. 177–185. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-00876-9_22 (25.09.2019). https://doi.org/10.1007/978-3-319-00876-9_22

15. Boccardi S., Boffa N.D., Carlomagno G.M., Meola C., Ricci F., Russo P., Simeoli G. Infrared thermography to impact damaging of composite materials // *Health Monitoring of Structural and Biological Systems*. 2017. Vol. 10170. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/315866805_infra-

[red_thermography_to_impact_damaging_of_composite_materials](https://doi.org/10.1117/12.2261077) (25.09.2019). <https://doi.org/10.1117/12.2261077>

16. Федотов М.Ю., Будадин О.Н., Васильев С.А., Медведков О.И., Козельская С.О. Исследование встроенной волоконно-оптической системы диагностики углепластика после воздействия технологических режимов формования // *Контроль и диагностика*. 2019. № 1. С. 42–49. <https://doi.org/10.14489/td.2019.01.pp.042-049>

17. Федотов М.Ю., Будадин О.Н., Козельская С.О. Технологические аспекты создания волоконно-оптической системы неразрушающего контроля трехслойных композитных конструкций // *Контроль и диагностика*. 2019. № 7. С. 24–29. <https://doi.org/10.14489/td.2019.07.pp.024-029>

18. Буланова В.О., Буланов Е.В., Пономарев С.В., Дивин А.Г. Установка для измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методами линейного и плоского импульсных источников теплоты // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2019. Т. 62. № 11. С. 1022–1029. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-11-1022-1029>

19. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мушенко В.Д. Зависимость теплопроводности композиционного материала на основе силикона от объемного содержания нитрида бора // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 4. С. 317–322. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-4-317-322>

20. Sfarra S., Cheilakou E., Theodorakeas P., Ibarra-Castaneda C., Zhang H., Kouli M., Maldague X. Inspecting historical vaulted ceilings by means of physical and chemical analyses: an integrated approach combining active infrared thermography and reflectance spectroscopy // *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2020. Vol. 62. No. 3. P. 144–151. <https://doi.org/10.1784/insi.2020.62.3.144>

References

1. Vavilov V.P. *Infrared Thermography and Thermal Control*. Moscow: Spectrum Publishing House; 2009, 562 p. (In Russ.)

2. Balageas D, Maldague X, Burleigh D, Vavilov VP, Oswald-Tranta B, Roche J-M, Pradere C, Carlomagno GM. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2016;35:18. <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0331-7>

3. Ibarra-Castaneda C., Maldague X.P. Infrared thermography. *Handbook of Technical Diagnostics: Fundamentals and Application to Structures and Systems*. Berlin: Springer; 2013, p. 175–220. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-25850-3_10 [Accessed 25th September 2019]. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3>

4. Hai Zhang, Verberne P, Meguid SA, Ibarra-Castaneda C, Maldague XPV. Autonomous high resolu-

tion inspection of kissbonds skins of carbon nanotube reinforced nanocomposites using novel dynamic line-scan thermography approach. *Composites Science and Technology*. 2020;192:108111. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108111>

5. Khomenko AP, Lukyanov AV, Kapustin AN. Development of Algorithms for Image Recognition according to Base Image in the Tasks of Locomotive Thermal Imaging Monitoring. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* = Modern technologies. System analysis. Modeling. 2004;3:51–58. (In Russ.)

6. Lukyanov AA, Kapustin AN, Lukyanov AV. Algorithmic and Program Support of Automated Termomonitoring and Equipment Diagnostics. *Kontrol. Diagnostika* = Testing. Diagnostics. 2005;9:45–53. (In Russ.)

7. Moiseychik EA, Vavilov VP. Analyzing Patterns of Heat Generated by the Tensile Loading of Steel Rods Containing Discontinuity-Like Defects. *International*

Journal of Damage Mechanics. 2018;27(6):950–960.
<https://doi.org/10.1177/1056789517715087>

8. Moyseychik EA, Vavilov VP, Kuimova MV. Infrared Thermographic Testing of Steel Structures by Using the Phenomenon of Heat Release Caused by Deformation. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2018;37:28.
<https://doi.org/10.1007/s10921-018-0482-4>

9. Kaledin VO, Vyachkin ES, Vyachkina EA, Budadin ON, Kozelskaya SO. Investigation of the Possibility of Thermal Control of Polymer Composite Structures while Heating by the Internal Source. *Kontrol. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2019;5:26–31.
<https://doi.org/10.14489/td.2019.05.pp.026-031> (In Russ.)

10. Shepard SM, Lhota JR, Rubadeux BA, Wang D, Ahmed T. Reconstruction and Enhancement of Active Thermographic Image Sequences. *Optical Engineering*. 2003;42(5):1337–1342.
<https://doi.org/10.1117/1.1566969>

11. Chulkov AO, Pradere C, Puiggali JR, Batsale JC, Vavilov VP. Estimating the Humidity of Wood by Terahertz Infrared Thermography. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016;52(12):753–757.
<https://doi.org/10.1134/S1061830916120044>

12. Cadelano G, Bortolin A, Ferrarini G, Molinas B, Giantin D, Zonta P, Bison P. Corrosion Detection in Pipelines Using Infrared Thermography: Experiments and Data Processing Methods. *Journal Nondestruct Eval*. 2016;35:49. <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0365-5>

13. Meola C, Carlomagno GM. Impact Damage in GFRP: New Insights with Infrared Thermography. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*. 2010;41(12):1839–1847.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.09.002>

14. Meola C, Carlomagno GM. Monitoring Materials under Impact with Infrared Thermography. *Thermomechanics & Infrared Imaging, Hybrid Techniques and Inverse Problems: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. 2013;8:177–185. Available from:
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-00876-9_22 [Accessed 25th September 2019].

https://doi.org/10.1007/978-3-319-00876-9_22

15. Voccardi S, Boffa ND, Carlomagno GM, Meola C, Ricci F, Russo P, Simeoli G. Infrared Thermography to

Impact Damaging of Composite Materials. *Health Monitoring of Structural and Biological Systems*. 2017;10170. Available from: URL:

https://www.researchgate.net/publication/315866805_Infrared_thermography_to_impact_damaging_of_composite_materials [Accessed 25th September 2019].

<https://doi.org/10.1117/12.2261077>

16. Fedotov MYu, Budadin ON, Vasil'ev SA, Medvedkov OI, Kozelskaya SO. Research of the Integrated Fiber-Optic System for the Diagnosis of Carbon Fiber Reinforced Plastic after the Impact of Technological Molding Modes. *Kontrol. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2019;1:42–49. (In Russ.)
<https://doi.org/10.14489/td.2019.01.pp.042-049>

17. Fedotov MYu, Budadin ON, Kozel'skaya SO. Technological Aspects of Creating a Fiber-optic Non-Destructive Testing of Sandwich Composite Structures. *Kontrol. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2019;7:24–29. (In Russ.)
<https://doi.org/10.14489/td.2019.07.pp.024-029>

18. Bulanova VO, Bulanov EV, Ponomarev SV, Divin AG. Installation for Measuring Thermophysical Properties of Heat-Insulating Materials by Methods of Linear and Planar Pulsed Heat Sources. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2019;11:1022–1029. (In Russ.)
<https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-11-1022-1029>

19. Mikheev V.A., Sulaberidze B. Sh., Mushenko V.D. Dependence of Thermal Conductivity of Silicone-Based Composite on Volume Concentration of Boron Nitride. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2016;59(4):317–322. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-4-317-322>

20. Sfarra S, Cheilakou E, Theodorakeas P, Ibarra-Castanedo C, Zhang H, Koui M, Maldague X. Inspecting historical vaulted ceilings by means of physical and chemical analyses: an integrated approach combining active infrared thermography and reflectance spectroscopy. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2020;62(3):144–151.
<https://doi.org/10.1784/insi.2020.62.3.144>

Критерии авторства

Лукьянов А.В., Кошкин 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.

Authorship criteria

Lukyanov A.V., Koshkin A.V. declare equal participation in obtaining and formalization of the 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.



Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лукьянов Анатолий Валерианович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры физики, механики
и приборостроения,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
✉ e-mail: loukian@inbox.ru

Anatoliy V. Lukyanov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Physics, Mechanics
and Instrument Making,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: loukian@inbox.ru

Кошкин Артем Васильевич,
магистрант,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: artyomvaskosh@gmail.com

Artem V. Koshkin,
Master Degree Student,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: artyomvaskosh@gmail.com



Оригинальная статья / Original article

УДК 621/9

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-295-302>

Оценка износостойкости инструментальных покрытий на основе имитационного моделирования

© Б.Я. Мокрицкий, Э.С. Ситамов

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

Резюме: Цель – разработать рекомендации по выбору инструментальных покрытий, рациональных при токарной обработке коррозионностойкой специализированной нержавеющей стали марки 09Х17Н7Ю. Для имитационного моделирования использована программная среда Deform. Моделирование выполнено по нескольким параметрам, в т.ч. по параметрам «температура», «напряжение», «деформация». Результаты моделирования сопоставлены с эксплуатационными параметрами (величиной износа инструментального материала). Имитационное моделирование проведено для различных 11 видов покрытий на твердосплавном субстрате марки ВК8. В качестве базового инструментального материала взят инструментальный твердый сплав марки ВК8, остальные инструментальные материалы отличаются лишь архитектурой (конструкция, состав, структура и метод нанесения) покрытий, нанесенных на субстрат ВК8. Инструментальные материалы распределены в последовательности по рациональности применения для обработки коррозионностойкой специализированной нержавеющей стали марки 09Х17Н7Ю, не имеющей аналогов по своим физико-механическим характеристикам и эксплуатационным свойствам. Область применения данной стали постоянно расширяется. Установлено, что для продольной токарной обработки стали марки 09Х17Н7Ю наиболее рациональны многослойные инструментальные покрытия TiCN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (5 мкм) + TiC (5 мкм); Al₂O₃ (2 мкм) + (Ti)CN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + TiN (3 мкм); (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм). Результаты, полученные имитационным моделированием, были проверены экспериментально. Достигнуто хорошее совпадение результатов (коэффициент регрессии изменялся в пределах от 0,9806 до 1,0). В результате имитационного компьютерного моделирования выявлены и подтверждены экспериментально наиболее рациональные инструментальные покрытия, необходимые при токарной обработке специализированной нержавеющей стали марки 09Х17Н7Ю.

Ключевые слова: имитационное моделирование, выбор инструментального материала, токарная обработка, твердосплавный субстрат, сталь, покрытие

Информация о статье: Дата поступления 13 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 16 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С. Оценка износостойкости инструментальных покрытий на основе имитационного моделирования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 295–302. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-295-302>

Evaluation of wear resistance of tool coatings based on simulation modelling

Boris Ya. Mokritskii, Eraj S. Sitamov

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

Abstract: This simulation study was aimed at developing rational recommendations on the selection of tool coatings when turning 09H17N7YU corrosion-resistant specialised stainless steel. The performed simulation, carried out in the Deform software environment, comprises the parameters of temperature, stress and deformation. The simulation results were compared with the operational parameters, i.e. the extent of tool material wear. Simulation modelling is performed for 11 various types of coatings on a VK8 hard-alloy substrate. A hard-alloy tool of the VK8 brand is taken as a base tool material. The other tool materials differ only in terms of the architecture (design, composition, structure and coating method) of the coatings applied to the VK8 substrate. Tool materials are distributed according to their rational application for processing 09H17N7YU corrosion-resistant specialised stainless steel, which has no analogues in terms of its physical and mechanical characteristics and operational properties. The application range of this steel is constantly expanding. It was found that the most rational multi-layer tool coatings for longitudinal turning of 09H17N7YU steel are TiCN (5 µm) + (TiAl)N (3 µm) + Al₂O₃ (5 µm) + TiC (5 µm); Al₂O₃ (2 µm) + (Ti)CN (5 µm) + (TiAl)N (3 µm) + TiN (3 µm); (TiAl)N (3 µm) + Al₂O₃ (3 µm) + (TiAl)N (3 µm) + Al₂O₃ (3 µm). The results of simulation modelling were tested experimentally. A good

match of results was achieved (the regression coefficient varies between 0.9806 and 1.0). By means of the computer simulation, the most rational tool coatings required for turning of 09H17N7U specialised stainless steel were identified and experimentally proved.

Keywords: simulation modeling, tool material selection, turning, hard-alloy substrate, steel, coating

Information about the article: Received February 13, 2020; accepted for publication March 16, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Mokritskii B.Ya., Sitamov E.S. Evaluation of wear resistance of tool coatings based on simulation modelling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):295–302. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-295-302>

1. ВВЕДЕНИЕ

Выбором рациональных покрытий для тех или иных условий эксплуатации занимались различные исследователи [1–4]. В условиях Российской Федерации наиболее в этом преуспела научная школа Московского государственного университета «Станкин». Зарубежные ведущие инструментальные фирмы свои достижения свели [5] в основном к информации в каталогах, сайтах и справочниках без указания принципиально важных сведений, таких, например, как способ нанесения покрытия, его структура.

Однако полученные ими результаты не применяются сегодня по следующим причинам:

1. Используемая нами коррозионно-стойкая специализированная нержавеющая сталь марки 09X17N7Ю создана в первой половине XX в. для нужд подводного судостроения. Разработанные тогда рекомендации по ее обработке сегодня морально и физически устарели уже потому, что на сегодняшний день нет того станочного оборудования, на применение которого были ориентированы рекомендации.

2. Отсутствуют прямые аналоги этой стали за рубежом. Поэтому рекомендации ведущих зарубежных инструментальных фирм применительно к своим подобным сталям оказываются неприменимы именно для стали 09X17N7Ю.

Наряду со всем этим, сегодня области применения стали 09X17N7Ю резко расширились. Она востребована в химическом производстве, в пищевой промышленности, в авиастроении и при изготовлении машин и устройств, работающих в

условиях агрессивных соляных растворов.

Указанное выше отсутствие нормативных рекомендаций по выбору инструментальных материалов прежде всего, по мнению авторов, связано с отсутствием метрологического обеспечения в целом в Российской Федерации и по вопросу выбора инструментальных материалов в частности [6–9].

Решения задач инструментального обеспечения известны [10–18], однако в них даны частные решения. Обобщающие рекомендации, систематизирующие и позволяющие создать банк сведений, отсутствуют.

В этой ситуации встал вопрос о необходимости разработки рекомендаций по выбору рациональных инструментальных покрытий применительно к современным условиям для обработки стали 09X17N7Ю.

Целью исследования является разработка рекомендации по выбору инструментальных покрытий, рациональных при токарной обработке коррозионно-стойкой специализированной нержавеющей стали марки 09X17N7Ю.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Программная среда Deform позволяет проводить имитационное моделирование более чем по десяти параметрам. Нами отобраны из этого числа параметров (как наиболее информативные) следующие: температура резания, напряжения в инструментальном материале, деформация инструментального материала и величина износа инструментального материала.



В некоторых случаях дополнительно получали результаты по параметру «сила резания».

Рассмотрены известные инструментальные материалы:

1. BK8 + TiCN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (5 мкм) + TiC (5 мкм);
2. BK8 + Al₂O₃ (2 мкм) + (Ti)CN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + TiN (3 мкм);
3. BK8 + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм);
4. BK8 + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм);
5. BK8 + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + (TiAl)N (2 мкм);
6. BK8 + TiCN (2 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (1,5 мкм);
7. BK8 + TiC (1,5 мкм) + TiN (3 мкм);
8. BK8 + TiN (2 мкм) + TiC (5 мкм);
9. BK8 + TiCN (0,5 мкм) + TiN (1 мкм);
10. BK8 + TiN (0,5 мкм) + TiC (1 мкм);
11. BK8.

В качестве базового материала взят инструментальный твердый сплав марки BK8, остальные инструментальные материалы отличаются лишь архитектурой (конструкция, состав, структура и метод нанесения) покрытий, нанесенных на субстрат BK8. Конструкция покрытия, его состав указаны в примененной выше форме написания инструментального материала. Поясним на примере материала, указанного под № 1 (см. выше). Нижний (т.е. нанесенный на субстрат BK8) слой является карбонитридом титана TiCN, толщина этого слоя 5 мкм, на него нанесено покрытие нитрида титана с алюминием (TiAl)N толщиной 3 мкм, на него нанесено алмазоподобное покрытие оксида алюминия Al₂O₃ толщиной 5 мкм, на него нанесен верхний слой покрытия карбидом титана TiC толщиной 5 мкм. Технология создания такого инструментального материала различна применительно к каждому слою покрытия. Например, нитридные (TiAl)N-покрытия наносились методом катодно-ионной бомбардировки (обычно используют обозначение КИБ) с ускоренным ассистированием ионов при применении работы двух катодов (один титановый (Ti), другой алюминиевый (Al)).

Карбонитридное покрытие TiCN выполнено тоже методом КИБ в азото- (N) и карбидо-содержащей среде (C). Карбидное покрытие TiC получено методом газотермического высокотемпературного осаждения. Сведения о тонкостях осаждения таких покрытий и о применяемом для этого оборудовании имеются в многочисленных работах профессоров А.С. Верещаки, С.Н. Григорьева, В.П. Табакова.

Для указанных инструментальных материалов предпочтительные режимы точения стали марки 09X17H7Ю выявляли следующим образом. Для выбранного режима резания имитационным моделированием выявляли рациональность (по величине износа) инструментальных покрытий. Для этого их выстраивали в рандометрический ряд по убыванию работоспособности инструмента (т.е. материал, показавший минимальную величину износа, ставили первым в ряду, а материал, показавший максимальную величину износа резца по задней грани – ставили последним). Затем испытывали их в реальных условиях резания. Также расставляли их в рандометрический ряд по величине износа за равное время эксплуатации. Это делали при разных величинах износа: 0,1 мм; 0,2 мм; 0,3 мм. Полученную последовательность расположения инструментальных материалов в рандометрическом ряду при имитационном моделировании и в рандометрическом ряду при натурном эксперименте сравнивали между собой. Она совпала. На этом основании сделан предварительный вывод об адекватности результатов имитационного моделирования.

Затем ставили задачу определить «чувствительность» имитационного моделирования на примере изменения толщины какого-либо слоя покрытия. Оказалось, что программная среда Deform по исследуемым нами параметрам позволяет отличить инструментальные материалы, толщина слоя покрытия в которых отличается на 0,5 мкм. Мы сочли это достаточным для решения нашей задачи.

В качестве входных параметров при применении программной среды Deform

задавали геометрические параметры режущих сменных токарных пластин, конструкцию и состав покрытий, параметры процесса резания (скорость резания, глубина резания, величина подачи) и ряд физико-механических характеристик стали 09Х17Н7Ю. В качестве выходных параметров получали:

1) величину износа h инструмента за заданное время работы;

2) температуру в разных участках зоны резания (принималась к учету величина максимальной температуры t^{ρ} вблизи режущего лезвия пластины по передней поверхности);

3) картину полей напряжений в инструментальном материале, в стружке, в обработанной поверхности;

4) величины максимальных и минимальных напряжений, формирующихся в инструментальном материале за первые 600 с течения (из нормальных, касательных, сжимающих, растягивающих и эквивалентных максимальных и минимальных напряжений принимали во внимание те напряжения σ , которые оказывались большими по величине, и те, которые являлись растягивающими σ_1 как наиболее провоцирующие образование микротрещин в слоях покрытий и приводящие к пластической деформации (течению) кобальтовой связки в субстрате ВК8);

5) величину максимальной относительной деформации ε субстрата ВК8 с учетом архитектуры каждого покрытия;

6) величины текущей (на протяжении указанных 600 с) деформации (субстрата ВК8 с учетом архитектуры каждого из покрытий) во взаимосвязи с текущими изменениями температуры и напряжений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Графическая иллюстрация одного из примеров (ВК8 + TiCN (0,5 мкм) + TiN (1 мкм)) применения результатов имитационного моделирования приведена на рис. 1.

Из данных рис. 1 прослеживается общность тенденций по приросту износа h , температуры t^{ρ} , напряжений σ и абсолютной деформации ε . Темпы прироста этих параметров разные, но прирост на всех параметрах очевиден. Наиболее интенсивен прирост по износу h и по деформации ε . Наименьший прирост по температуре t^{ρ} резания. Эти результаты не противоречат сложившимся в мировой практике представлениям. В силу этого нами сделан вывод об адекватности результатов, получаемых при имитационном моделировании.

Расширенная информация приведена на рис. 2.

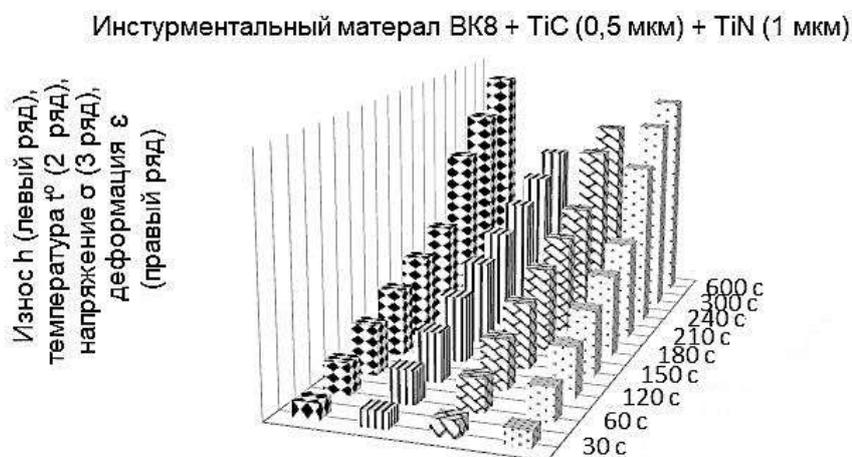
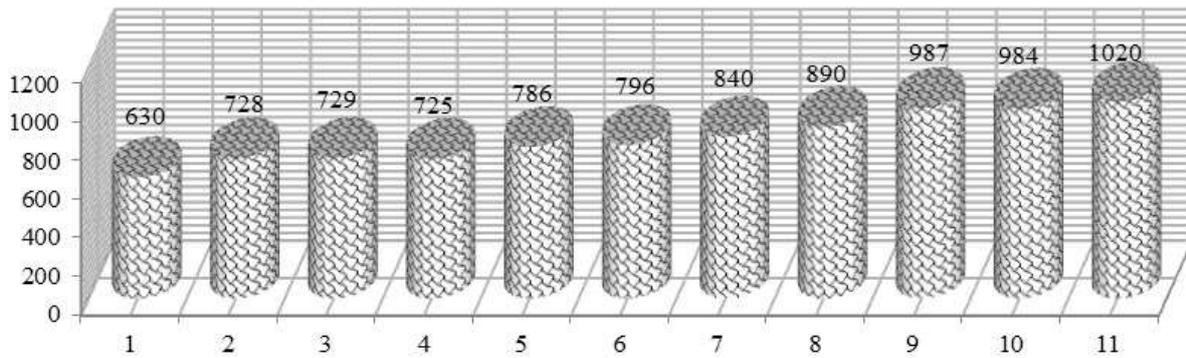
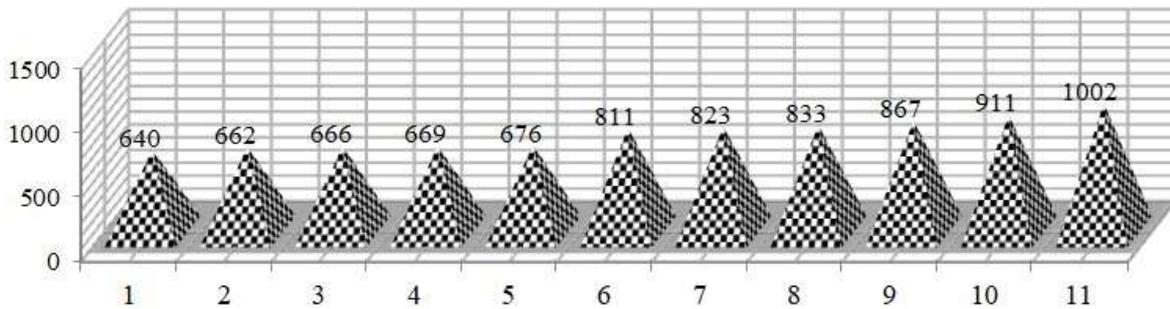


Рис. 1. Взаимосвязь тенденции изменения износа одного из инструментальных материалов в начальный период резания (до 600 с) (в скобках указана толщина слоя покрытия)

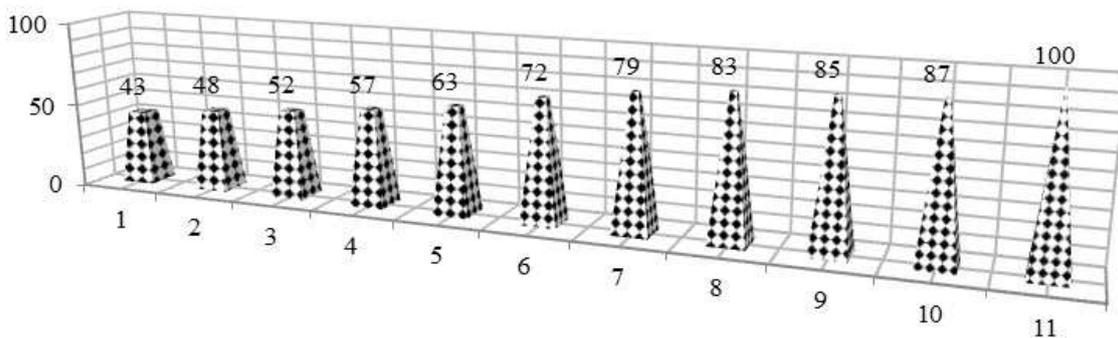
Fig. 1. Correlation of the trend of one of the tool material wear variation in the initial cutting period (up to 600 s) (thickness of the coating layer is specified in brackets)



a



b



c

Рис. 2. Результаты имитационного моделирования по параметрам (число, указанное около единицы измерения мкм, показывает толщину данного слоя покрытия): а – температура (t), °C; б – напряжение (σ) в инструментальном материале, МПа; с – величина износа (в условных процентах): 1. VK8 + TiCN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (5 мкм) + TiC (5 мкм); 2. VK8 + Al₂O₃ (2 мкм) + TiCN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + TiN (3 мкм); 3. VK8 + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм); 4. VK8 + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм); 5. VK8 + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + (TiAl)N (2 мкм); 6. VK8 + TiCN (2 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (1,5 мкм); 7. VK8 + TiC (1,5 мкм) + TiN (3 мкм); 8. VK8 + TiN (2 мкм) + TiC (5 мкм); 9. VK8 + TiCN (0,5 мкм) + TiN (1 мкм); 10. VK8 + TiN (0,5 мкм) + TiC (1 мкм); 11. VK8

Fig. 2. Results of simulation modeling by parameters (the number specified near the unit of measurement in microns shows the thickness of the given coating layer): a – temperature (t), °C; b – stress (σ) in the tool material, MPa; c – wear amount (in conventional percentages): 1. VK8 + TiCN (5 μm) + (TiAl)N (3 μm) + Al₂O₃ (5 μm) + TiC (5 μm); 2. VK8 + Al₂O₃ (2 μm) + TiCN (5 μm) + (TiAl)N (3 μm) + TiN (3 μm); 3. VK8 + (TiAl)N (3 μm) + Al₂O₃ (3 μm) + (TiAl)N (3 μm) + Al₂O₃ (3 μm); 4. VK8 + TiN (3 μm) + TiC (3 μm) + TiN (3 μm) + TiC (3 μm); 5. VK8 + TiC (3 μm) + TiN (3 μm) + (TiAl)N (2 μm); 6. VK8 + TiCN (2 μm) + TiC (3 μm) + TiN (1.5 μm); 7. VK8 + TiC (1.5 μm) + TiN (3 μm); 8. VK8 + TiN (2 μm) + TiC (5 μm); 9. VK8 + TiCN (0.5 μm) + TiN (1 μm); 10. VK8 + TiN (0.5 μm) + TiC (1 μm); 11. VK8

Данные рис. 2 свидетельствуют о том, что в рандометрических рядах указанные инструментальные материалы имеют одинаковую тенденцию по параметрам «температура резания», «напряжение в инструментальном материале», «износ инструмента». Это позволило еще раз убедиться в адекватности результатов имитационного моделирования и выявить наиболее рациональные инструментальные материалы.

Рис. 2 иллюстрирует достижение поставленной цели, а именно: из него очевидно, что при продольном точении стали 09X17H7Ю наиболее рациональны многослойные покрытия $ВК8 + TiCN$ (5 мкм) + $(TiAl)N$ (3 мкм) + Al_2O_3 (5 мкм) + TiC (5 мкм); $ВК8 + Al_2O_3$ (2 мкм) + $TiCN$ (5 мкм) + $(TiAl)N$ (3 мкм) + TiN (3 мкм); $ВК8 + (TiAl)N$ (3 мкм) + Al_2O_3 (3 мкм) + $(TiAl)N$ (3 мкм) + Al_2O_3 (3 мкм). Это в основном объясняется самим фактом многослойности покрытия (на каждой границе раздела слоев покрытия происходит торможение прироста микротрещин). На рис. 2 видно, что начиная с трехслойного покрытия $5 ВК8 + TiC$ (3 мкм) + TiN (3 мкм) + $(TiAl)N$ (2 мкм) износостойкость инструментальных материалов снижается более заметно. Это взаимосвязано с аналогичным изменением прироста температуры (рис. 2 а) и напряжений (рис. 2 с).

Результаты, полученные имитационным моделированием, были проверены экспериментально. Достигнуто хорошее

совпадение результатов (коэффициент регрессии изменялся в пределах от 0,9806 до 1,0).

Дополнительные сведения приведены в работах [19, 20] авторов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. По результатам имитационного компьютерного моделирования выявлены и подтверждены экспериментально наиболее рациональные инструментальные покрытия, необходимые при токарной обработке специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю. Имитационное моделирование выполнено при применении программной среды Deform по нескольким параметрам.

2. Инструментальные покрытия в сравнении с субстратом ВК8 заметно снижают уровни достигаемой температуры, напряжений, деформаций. Максимальная температура резания и максимальный темп ее прироста отмечены у инструментального материала без покрытия.

3. Характер протекания деформационных процессов при применении инструмента с покрытием выше, чем при применении инструмента без покрытия. Это позволяет прогнозировать снижение силы резания и, соответственно, прирост износостойкости инструмента с покрытием.

Библиографический список

1. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V. [et al]. Increase in Efficiency of End Milling of Titanium Alloys Due to Tools with Multi-layered Composite Nano-Structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N Coatings // Coating. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
2. Özel T., Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2000. Vol. 40. P. 133–152. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6)
3. Chandrakanth S., Xiaomin D. Finite Element Analysis of the Orthogonal Metal Cutting Process // Journal of Materials Processing Technology. 2000. Vol. 105. Issue 1–2. P. 95–109. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00595-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00595-1)
4. Shatla M., Kerk Ch., Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2001. Vol. 41. P. 1511–1534. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(01\)00016-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(01)00016-5)
5. Rao G.V.G., Mahajan H., Bhatnagar N. Mikro-mechanical modeling of machining of FRP composites – Cutting force analysis // Composites Science and Technology. 2007. Vol. 67. Issue 3–4. P. 579–593. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.010>
6. Чирков А.П. Роль метрологического обеспечения в инновационной деятельности // Главный метролог. 2013. № 1. С. 20–24.
7. Чирков А.П. Инфраструктурное обеспечение внедрения наукоемких технологий: монография //



Социально-экономические аспекты технологической модернизации современного машиностроительного производства: сб. статей / под ред. А.В. Киричека. М.: Изд. дом «Спектр», 2013. С. 78–120.

8. Чирков А.П. Количественная оценка влияния метрологии на экономику // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 8. С. 45–51.

9. Матвеев В.И. Точные измерения – основа качества и безопасности // Контроль. Диагностика. 2019. № 8. С. 4–11. <https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>

10. Kornopoltsev V., Mognonov D., Ayurova O., Dashitsyrenova M., Subanakov A. Investigation of Tribological Properties of Sheet Metalfluoroplastic Materials // Letters on materials. 2018. Vol. 8. No. 3. P. 235–239. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-3-235-239>

11. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Y., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Y. Study of Mechanism of Failure and Wear of Multi-Layered Composite Nano-Structured Coating Based on System Ti-TiN-(ZrNbTi)N Deposited on Carbide Substrates // Journal of Nano Research. 2017. Vol. 45. P. 110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>

12. Kornopoltsev V.N., Mognonov D.M., Ayurova O.Zh., Buyantuev S.L. New Tribological Composites Based on Polytetrafluoroethylene // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 108–111. <https://doi.org/10.1134/S2075113317010208>

13. Mokritskii B.Y., Pustovalov D.A., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Verhoturov A.D. Evaluation of Efficiency of Edge Tool on the Basis of New Technique for Analyzing Parameters of Scribing Mark // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 719–720. P. 96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>

14. Сотова Е.С., Верещака А.А., Верещака А.С. Керамические режущие инструменты. М.: Изд-во МГТУ

"Станкин", 2013. 148 с.

15. Mokritskii B.Y., Pustovalov D.A., Vereschaka A.A. Comparative Evaluation of Efficiency of Metal-Cutting Tool by Method of Pendulum Scribing // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 798. P. 452–456. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.798.452>

16. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол: Изд-во «ТНТ», 2011. 379 с.

17. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Determination of maximum working capacity of retrofittable cutters on the basis of physical-mechanical features of tool hard alloys // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: WEB of Conferences. 2018. Vol. 224. P. 1–6. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/83/mateconf_icmtmte2018_01046.pdf (27.02.2019).

<https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401046>

18. Tveryakov A.M., Shtin A.S. Setup for determining the maximum temperature for increased performance longevity of replaceable cutting discs // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1785. P. 040088. [Электронный ресурс]. URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4967145> (27.02.2019).

<https://doi.org/10.1063/1.4967145>

19. Верещагин В.Ю., Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С. Методология выбора эффективного покрытия на основе моделирования напряжений в режущем инструменте // Металлообработка. 2018. № 2. С. 19–22.

20. Ситамов Э.С., Мокрицкий Б.Я. Результаты сравнительного исследования износостойкости твердосплавного инструмента при обработке нержавеющей стали // Металлообработка. 2018. № 4. С. 7–13.

References

1. Vereschaka A, Oganyan M, Bublikov Yu, Sitnikov N, Deev K, Pupchin V, et al. Increase in Efficiency of End Milling of Titanium Alloys Due to Tools with Multilayered Composite Nano-Structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N Coatings. *Coating*. 2018;8(11):395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>

2. Özel T, Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000;40:133–152. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6)

3. Chandrakanth S, Xiaomin D. Finite Element Analysis of the Orthogonal Metal Cutting Process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;105(1–2):95–109. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00595-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00595-1)

4. Shatla M, Kerk Ch, Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2001;41:1511–1534. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(01\)00016-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(01)00016-5)

5. Rao GVG, Mahajan H, Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – Cutting force analysis. *Composites Science*

and Technology. 2007;67(3–4):579–593. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.010>

6. Chirkov AP. The role of metrological support in innovation. *Glavnii metrolog* = Chief Metrologist. 2013;1:20–24.

7. Chirkov AP. Infrastructural support for high technology introduction: monograph. In: Kirichek AV (eds.). *Social'no-ekonomicheskie aspekty tehnologicheskoy modernizacii sovremennogo mashinostroitel'nogo proizvodstva* = Socio-economic aspects of technological modernization of modern engineering production. Moscow: Spektr; 2013, p. 78–120. (In Russ.)

8. Chirkov AP. A quantitative assessment of the impact on the economy of metrology. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* = Handbook. An Engineering Journal. 2013;8:45–51. (In Russ.)

9. Matveev VI. Precise measurements – the basis of quality and safety 2019. *Kontrol'. Diagnostika* = Testing. Diagnostics. 2019;8:4–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>

10. Kornopoltsev V, Mognonov D, Ayurova O, Dashitsyrenova M, Subanakov A. Investigation of Tribological Properties of Sheet Metalfluoroplastic Materials. *Letters on materials*. 2018;8(3):235–239.

<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-3-235-239>

11. Vereschaka AA, Mokritskii BYa, Sitnikov NN, Ogan'yan GV, Aksenenko AY. Study of Mechanism of Failure and Wear of Multi-Layered Composite Nano-Structured Coating Based on System Ti-TiN-(ZrNbTi)N Deposited on Carbide Substrates. *Journal of Nano Research*. 2017;45:110–123.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>
12. Kornopoltsev VN, Mogonov DM, Ayurova OZh, Buyantuev SL. New Tribological Composites Based on Polytetrafluoroethylene. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017;8(1):108–111.
<https://doi.org/10.1134/S2075113317010208>

13. Mokritskii BYa, Pustovalov DA, Vereschaka AA, Vereschaka AS, Verhoturov AD. Evaluation of Efficiency of Edge Tool on the Basis of New Technique for Analyzing Parameters of Scribing Mark. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;719-720:96–101.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>

14. Sotova ES, Vereshchaka AA, Vereshchaka AS. *Ceramic cutting tools*. Moscow: MSTU "STANKIN"; 2013, 148 p. (In Russ.)

15. Mokritskii BYa, Pustovalov DA, Vereschaka AA. Comparative evaluation of efficiency of metal-cutting tool by method of pendulum scribing. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;798:452–456.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.798.452>

Критерии авторства

Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С. 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Ситамов Эрадж Сикандарович,
аспирант,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия;
e-mail: eraj_2303@mail.ru

16. Grigor'ev SN, Tabakov VP, Volosova MA. *Technological methods to increase wear resistance of cutting pads*. Staryj Oskol: TNT; 2011, 379 p. (In Russ.)

17. Artamonov EV, Tveryakov AM, Shtin AS. Determination of maximum working capacity of retrofittable cutters on the basis of physical-mechanical features of tool hard alloys. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: WEB of Conferences*. 2018;224.1–6. Available from: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/83/mateconf_icmtmte2018_01046.pdf [Accessed 27th February 2019].
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401046>

18. Tveryakov AM, Shtin AS. Setup for determining the maximum temperature for increased performance longevity of replaceable cutting discs. In: *AIP Conference Proceedings*. 2016;1785:040088. Available from: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4967145> [Accessed 27th February 2019].
<https://doi.org/10.1063/1.4967145>

19. Vereschaka VYu, Mokritskii BYa, Vereshchagina AS. Methodology of selecting effective covering based on modeling of stresses in cutting tools. *Metallorabotka*. 2018;2:19–22. (In Russ.)

20. Sitamov ES, Mokritskii BYa. Results of comparative investigation of wear-resistance of meldomed tools for stainless steel processing. *Metallorabotka*. 2018;4:7–13. (In Russ.)

Authorship criteria

Mokritskii B.Ya., Sitamov E.S. 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.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris Ya. Mokritskiy,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27 Lenin Ave., Komsomolsk-na-Amure 681013, Russia;
✉ e-mail: boris@knastu.ru

Eraj S. Sitamov,
Postgraduate Student,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27 Lenin Ave., Komsomolsk-na-Amure 681013, Russia;
e-mail: eraj_2303@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.181

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-303-317>

Исследование и модернизация тепловой схемы котла ТГМЕ-444 с целью повышения надежности и экономичности его работы

© **А.Н. Безгрешнов**, Н.В. Усиков, Е.М. Дьяконов

*Южно-Российский государственный политехнический университет
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия*

Резюме: Цель – изучение основных проектных решений, заложенных в конструкцию котла ТГМЕ-444, обеспечивающих надежную работу поверхностей нагрева и высокие экономические показатели при сжигании мазута. С 1973 по 1993 г. котлы работали исключительно на мазуте, а с 1993 г. и по настоящее время – только на природном газе. Длительный опыт эксплуатации котлов при сжигании природного газа показал, что по условиям надежности температурного режима ширмоконвективного пароперегревателя опускного газохода котлы не могут работать с нагрузками более ~117 кг/с (420 т/ч). Причины повышенных впрысков при сжигании природного газа обусловлены принятыми в проекте решениями по составу поверхностей нагрева котла. Основные технические решения по тепловой схеме котла принимались по наиболее тяжелому топливу – мазуту. Рассмотрено несколько вариантов тепловых схем, сформированных с учетом возможностей их исполнения в существующих габаритах топки и конвективных газоходов котла с учетом перевода его на сжигание природного газа: замена пароперегревательных топочных ширм на парообразующие с включением их в схему циркуляции котла; увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева (при снижении расхода на впрыски) введением в топку газов рециркуляции, отбираемых после экономайзера. Расчеты выполнялись с использованием программ теплового и гидравлического расчета паровых котлов ТРАКТ, Гидравлика, Boiler Designer. По результатам рассчитанных вариантов было установлено, что изменением конструкции и тепловосприятия пароперегревательных поверхностей нагрева котла можно добиться значительного снижения расходов на впрыски, снизить тепловую разверку и повысить надежность их работы с сохранением высокого уровня экономических показателей; наибольший эффект снижения расходов на впрыски достигается в случаях, когда пароперегревательные топочные ширмы заменяются на парообразующие с включением их в схему циркуляции котла; увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева за счет перевода пароперегревательных ширм в топку в парообразующие приводит к увеличению недогрева воды на выходе из экономайзера, что повышает устойчивость его работы.

Ключевые слова: паровой котел ТГМЕ-444, вихревая топка, поверхности нагрева, тепловосприятие водосодержащих и парогенерирующих поверхностей, совершенствование тепловой схемы

Информация о статье: Дата поступления 10 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 30 января 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: **Безгрешнов А.Н.**, Усиков Н.В., Дьяконов Е.М. Исследование и модернизация тепловой схемы котла ТГМЕ-444 с целью повышения надежности и экономичности его работы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 303–317. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-303-317>

Research and modernisation of TGME-444 boiler thermal circuit in order to increase its reliability and efficiency

Alexander N. Bezgreshnov, Nikolay V. Usikov, Evgeniy M. Dyakonov

Platov South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

Abstract: This paper is aimed at studying the main design solutions of the TGME-444 boiler, which ensure reliable operation of heating surfaces and high economic indicators when burning fuel oil. In the Russian context, such boilers relied on fuel oil from the period 1973-1993, whereas, from 1993 to the present time, the fuel was switched to natural gas. Extensive experience of boiler operation when burning natural gas shows that, according to the temperature regime reliability of the curtain convective superheater of the drop flue gas duct, the boilers cannot operate with the loads more than ~117 kg/s (420 t/h). The reasons for the increased injections when burning natural gas are due to the project decisions on the composition of boiler heating surfaces. The main engineering solutions for the boiler thermal circuit were optimised for fuel oil as the heaviest fuel. Thus, consideration was given to the several variants of thermal circuits formed

with regard to their potential implementation within existing furnace and convective gas duct configurations taking the conversion to natural gas fuel into account. These are: replacement of steam superheating furnace curtains with steam generators and inclusion of the latter in the boiler circulation cycle; increase in heat absorption of water-containing heating surfaces (under reduced injection flow) by the introduction of recirculation gases withdrawn after the economiser into the furnace. Calculations were performed using TRAKT, Hydraulics, Boiler Designer programs for thermal and hydraulic calculation of steam boilers. The results of calculated variants informed changes in the design and heat absorption of boiler reheating surfaces that significantly reduced the cost of injections and thermal upset, whereas operational reliability was able to be increased while maintaining a high-level of economic indicators. The greatest effect of reducing injection costs is achieved in cases when reheating furnace curtains are replaced by steam generating curtains, with the latter included in a boiler circulation scheme. Thus, increasing the heat absorption of water-containing heating surfaces by converting superheating furnace curtains into steam-generating curtains decreases water overheating at the economiser outlet, improving operational stability.

Keywords: TGME-444 steam boiler, vortex furnace, heating surfaces, thermal absorption of water-containing and steam-generating surfaces, thermal circuit improvement

Information about the article: Received December 10, 2019; accepted for publication January 30, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Bezgreshnov AN, Usikov NV, Dyakonov EM. Research and modernisation of TGME-444 boiler thermal cycle in order to increase its reliability and efficiency. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):303–317. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-303-317>

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы экономии затрат на производство электрической и тепловой энергии всегда были в центре внимания теплотехников. Исчерпание или ухудшение качества проектных запасов топлива (твердых, жидких и газообразных), ввод в оборот новых видов, например, твердых бытовых отходов, отходов различных производств (в частности, нефтяного кокса) и т.п., вопросы охраны окружающей среды, структурные изменения цен на первичное топливо, поступающее на электростанции, придают особое внимание необходимости совершенствования энергетического оборудования. Во Всероссийском теплотехническом институте (ВТИ) систематически проводятся международные конференции, посвященные решению возникающих задач [1, 2], очередная намечена на октябрь 2020 г.

Исследование и анализ отдельных систем тепловых электростанций и котельных проводились отечественными учеными и конструкторами – Н.В. Головановым, Л.И. Павленко, А.А. Паршиным, Б.М. Шлейфером, В.В. Митором, В.А. Двойнишниковым, Ю.М. Липовым и др. Исследования, посвященные описанию технологических схем, режимам работы оборудования и практическим вопросам его эксплуатации, разработке методов расчета, проводились в ведущих научно-исследовательских институтах страны, конструкторских предприятиях и ВУЗах¹⁻³ [3–14]. Были в основном разработаны теоретические вопросы формирования тепловых схем котлов, применяемые в практике проектирования^{1,4,5} [10], в частности на Таганрогском котельном заводе «Красный котельщик».

Много внимания этим вопросам уделяется и за рубежом [15–20], хотя при-

¹Безгрешнов А.Н., Павленко Л.И., Паршин А.А., Шлейфер Б.М. Выбор тепловой схемы при проектировании парогенераторов: учеб. пособ. Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1979. 79 с.

²Акимов Ю.И., Васильев А.В., Антропова Г.В. Тепловой расчет котлоагрегатов: учеб. пособ. Саратов: Изд-во СГТУ, 2006. 95 с.

³Гиль А.В. Формирование исходных данных для проектирования и моделирования паровых котлов: учеб. пособ. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 72 с.

⁴Безгрешнов А.Н. Принятие проектных решений при проектировании паровых котлов: учеб. пособ. Новочеркасск: Изд-во НГТУ, 1997. 124 с.

⁵Изюмов М.А. Методология принятия технических решений на стадии проектирования паровых котлов: учеб. пособ. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 108 с.



меняемые подходы для решения возникающих задач довольно сильно отличаются от принятых в России. При проектировании котельных установок применяются методы численного моделирования процессов сжигания топлива, теплообмена, аэродинамики. Широко используются методы термоэкономической оптимизации котельных установок, особенно при проектировании парогазовых блоков.

Основные характеристики котла ТГМЕ – 444 (конструкция, тепловая схема, результаты работы на мазуте) взяты по данным [3–6, 8]. Разработка вариантов реконструкции котла при замене мазута на природный газ потребовала фактических данных о параметрах рабочей среды и продуктах сгорания в различных режимах. Из-за невозможности реализации требуемых режимов по техническому состоянию котла (невозможность поднять нагрузку выше ~116,7 кг/с (420 т/ч) при работе на природном газе) были проведены тепло-гидравлические расчеты по программам TRAKT, Гидравлика⁶, Boiler Designer^{7,8}.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ (КОТЛОАГРЕГАТА)

Опытно-промышленные котлы типа Е-500-140 ГМВН (ТГМЕ-444) с естественной циркуляцией с вихревой топкой Центрального котлотурбинного института (ЦКТИ) выполнены из газоплотных панелей и предназначены для работы под наддувом. Котлы работают в блоке с теплофикационными турбинами типа ПТ 80/100-130 ЛМЗ или Т-110/120 УТМЗ. Они имеют трехходовую компоновку поверхностей нагрева с размерами в плане по осям колонн 17,0x13,75 м. Отметка балки верхнего пе-

рекрытия – 22,700 м, наивысшая отметка – 23,924 м.

Котлоагрегат состоит из топочной камеры, горизонтального газохода, опускающего и подъемного конвективных газоходов (рис. 1).

В топочной камере, образованной испарительными экранами, размещен ширмовый пароперегреватель, расположенный в камере охлаждения у заднего экрана. В опускающем газоходе и в средней части подъемного газохода расположены ширмоконвективные элементы пароперегревателя. В верхней части подъемного газохода находятся два пакета водяного экономайзера.

Подъемный конвективный газоход двумя газоходами соединен с регенеративным вращающимся воздухоподогревателем РВП-88, установленным вне здания котельной с фронта котла.

Основные расчетные характеристики приведены в табл. 1 и 2.

Учитывая весьма оригинальную и новую конструкцию малогабаритного котла разработки ЦКТИ, характерные особенности рассмотрены несколько более подробно, чем это обычно принято.

Топочная камера состоит из горизонтальной цилиндрической вихревой камеры горения и призматической камеры охлаждения. Диаметр (условный) камеры горения и глубина камеры по осям труб – 3,920 м, ширина топочной камеры по осям – 13,658 м. Два двухсветных экрана, расположенные параллельно боковым стенам, делят топочную камеру по всей высоте на три отсека, соединенные в нижней части между собой лазами в экранах. Все экраны топки выполняются в виде газоплотных цельносварных панелей из плавниковых труб.

⁶Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 5251 / А.Б. Баранников, А.А. Белов, В.С. Федоров. Правообладатель Московский государственный университет леса.

⁷Носков А.И. Руководство для пользователей «Справочные материалы по программе TRAKT». Подольск: ЗИО, 1984. 40 с.

⁸Доверман Г.И. Руководство для пользователей «Справочные материалы по программе BOILER DESIGNER». М.: OPTSIM-K, 2004. 215 с.

⁹На основании письма № 19/4105 от 23.11.99 г. Таганрогского котельного завода-изготовителя «Красный котельщик» максимально допустимая нагрузка по условиям надежности температурного режима зигов составляет 420 т/ч.

В районе задней стены камеры охлаждения расположено 12 вертикальных ширм пароперегревателя из плавниковых труб. Лобовая трубка каждой ширмы защищена от излучения факела трубой, включенной в задний экран топки.

На фронтальной стене камеры горения под углом 12° к горизонтали расположено шесть прямооточных газомазутных горелок (по две горелки в каждом отсеке топочной камеры).

Экраны топки состоят из 20 блоков: 6 блоков фронтального экрана, 6 блоков заднего экрана, 4 блока боковых экранов и 4 блока двухсветных экранов. Все экраны включены в контуры естественной циркуляции.

С целью уменьшения влияния неравномерности обогрева на надежность циркуляции блоки двухсветных и боковых экранов секционированы.

Парогенератор имеет двухступенчатую схему испарения. Пароводяная смесь первой ступени испарения из фронтального, заднего, двухсветных и примыкающих к фронту секций боковых экранов поступает во внутрибарабанные циклоны. Во вторую ступень испарения включены блоки (секции) боковых экранов, примыкающих к задней стенке топки и четырех выносных циклонов, расположенных попарно у боковых стен топочной камеры.

Пароперегреватель. В состав пароперегревателя входят ограждающие экраны горизонтального, опускного и подъемного газоходов, топочные ширмы и ширмоконвективные элементы опускного и подъемного газоходов. Экраны горизонтального, опускного и подъемного газоходов выполнены из плавниковых труб. Ширмоконвективный пароперегреватель (ШКПП) состоит из двух частей. Пароперегреватель

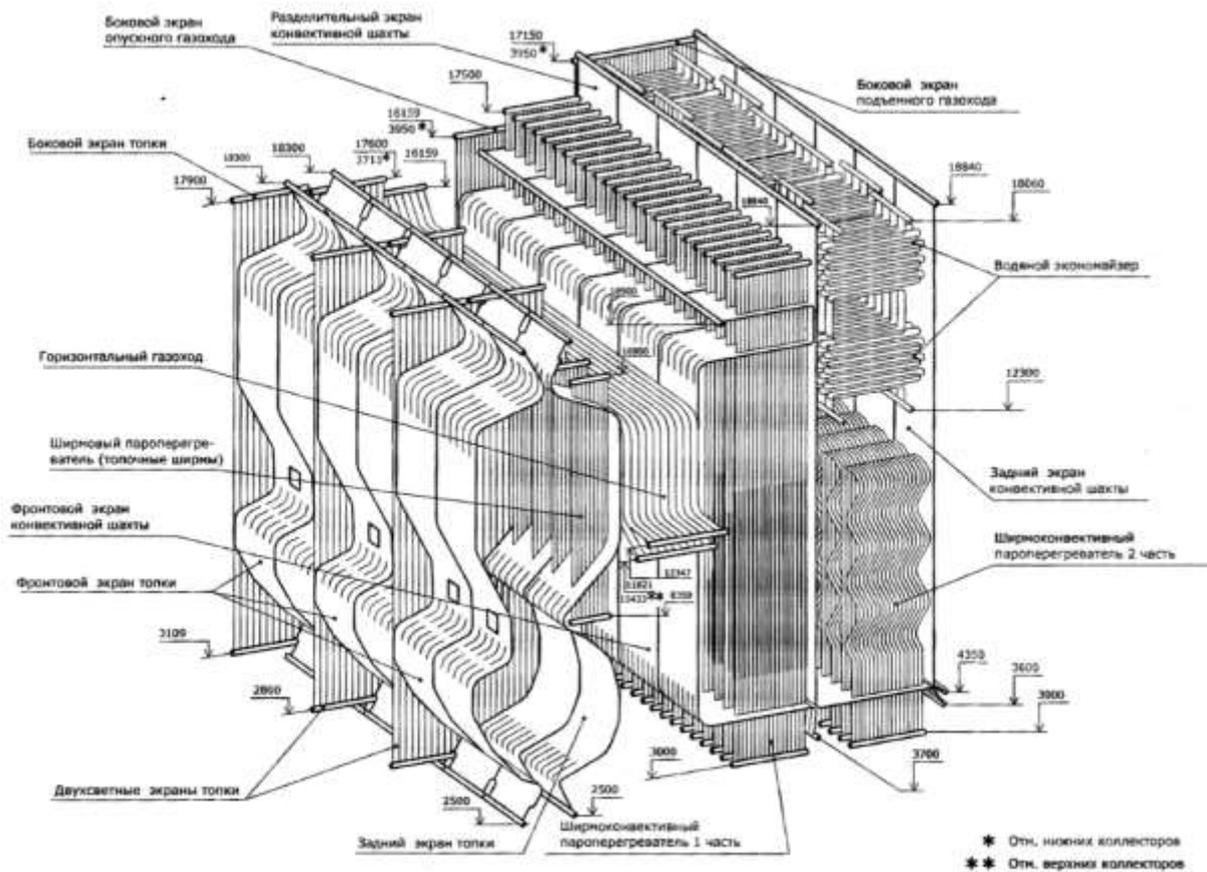


Рис. 1. Компоновочная схема котла ТГМЕ-444
Fig. 1. TGME-444 boiler layout



Таблица 1

Конструктивные (расчетные) характеристики котла

Table 1

Boiler design characteristics

Производительность котла, кг/с (т/ч)	138,9 (500 ⁹)
Давление в барабане, МПа (бар)	15,5 (155)
Давление перегретого пара, МПа (бар)	14,0 (140)
Температура перегретого пара, °С	560
Топливо	мазут, природный газ
Лучевоспринимающая поверхность нагрева, м ²	
а) камеры горения	264
б) камеры охлаждения	545
в т.ч. ширмы	140
Поверхности нагрева: горизонтального подъемного и опускающего газоходов, м ²	963
ширмоконвективного пароперегревателя:	
а) 1 часть	1503
б) 2 часть	1112
водяного экономайзера, м ²	2515
регенеративного воздухоподогревателя, м ²	
а) горячей части	44636
б) холодной части	10978
Давление газа в верхней части топки котла, Па (мм вод. ст.)	3924 (400)

Таблица 2

Расчетные показатели работы котла

Table 2

Boiler estimated performances

Параметры	Мазут	Газ
Температура питательной воды, °С	230	230
КПД парогенератора, %	94,63	95,37
Температура холодного воздуха, °С	70	30
Температура уходящих газов, °С	131	112
Избыток воздуха, α	1,03	1,05
Расход топлива, кг/с (кг/ч),	9,44 (34000)	10,22 (36800)
Температура горячего воздуха, °С	353	336
Температура газов на выходе из топки, °С	1348	1377

опускающего газохода выполнен из ширмоконвективных элементов, представляющих собой сочетание ширм и зигзагов, 12 рядов зигзагов располагаются в промежутках между ширмами. В верхней части зигзаги имеют прямые (ширмовые) участки высотой 4,5 м от потолка.

В пароперегревателе подъемного газохода ширмы непосредственно переходят в зигзаги без промежуточных коллекторов. Ширмовая часть выполнена из плав-

никовых труб, зигзаги гладкотрубные.

Регулирование температуры пара. Для регулирования температуры пара на котле установлены последовательно три впрыскивающих пароохладителя. В качестве охлаждающей среды используется собственный конденсат.

Первый впрыск расположен перед топочными ширмами и служит для защиты труб топочного ширмового пароперегревателя.

Второй впрыск расположен за топочными ширмами (перед ширмами опускающего газохода) и служит для защиты труб ширмоконвективного пароперегревателя опускающего газохода.

Третий впрыск располагается перед ширмоконвективным пароперегревателем подъемного газохода и служит для регулирования температуры перегретого пара на выходе из котла при переменных режимах работы.

Суммарный расход воды на впрыски на номинальной нагрузке составляет около ~27,8 кг/с 100 т/ч. Большая величина впрысков обусловлена расширением предела регулирования с поддержанием номинальной температуры пара за котлом в диапазоне 100–50% производительности котла. На всех впрыскивающих линиях установлены измерительные диафрагмы.

Водяной экономайзер располагается в верхней части подъемного газохода. Он состоит из двух пакетов двухзаходных змеевиков в каждом пакете. Расположение труб – шахматное. Экономайзер расположен перпендикулярно фронту котла, движение воды – подъемное.

Конденсационная установка. Для получения собственного конденсата на котле установлены две конденсационные установки (по одной на каждой стороне котла). Конденсационные установки расположены на потолочном перекрытии котла над конвективной шахтой и состоят из 6-ти конденсаторов и двух конденсатосборников.

Конденсация насыщенного пара, поступающего из барабана котла, производится путем охлаждения его питательной водой.

Барабан и сепарационное устройство. Барабан изготовлен из стали 16ГНМА. Внутренний диаметр барабана – 1600 мм, толщина стенки – 115 мм, длина барабана – 19900 мм.

Пароводяная смесь из экранов поступает в 52 внутривибарабанных циклона. Промывка пара осуществляется в слое питательной воды, поддерживаемом на дырчатом листе. Пар проходит через отверстия диаметром 5 мм в дырчатом листе и бар-

ботирует через слой питательной воды, освобождаясь от имеющихся в нем солей. Слой воды поддерживается постоянным, излишки стекают через сливные короба. На промывку пара поступает половина расхода питательной воды, остальная часть подается в нижнюю часть барабана. Для сепарации влаги, уносимой с паром при промывке, установлены потолочные жалюзи.

Основные проектные решения, заложенные в конструкцию котла, должны были обеспечить надежную работу поверхностей нагрева и высокие экономические показатели при сжигании мазута.

Снижение температуры продуктов сгорания до заданного значения на выходе из топки достигается увеличением лучистой поверхности топки за счет установки двухцветных экранов и топочных пароперегревательных ширм. Применение новых элементов – ширмоконвективных пароперегревателей в опускающем и подъемном газоходах обеспечило необходимый перегрев пара при приемлемых расходах на впрыски при сжигании мазута [9, 12, 13].

3. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

С 1973 по 1993 г. котлы работали исключительно на мазуте, а с 1993 г. и по настоящее время – только на природном газе. Длительный опыт эксплуатации котлов при сжигании газа показал, что по условиям надежности температурного режима ширмоконвективного пароперегревателя опускающего газохода котлы не могут работать с нагрузками более ~116,7 кг/с (420 т/ч) [9].

Проблемы с надежностью пароперегревателей при работе на природном газе начали выявляться после ~50000 ч работы в 1988 г. – стали происходить разрывы труб зигов ширмоконвективного пароперегревателя опускающего газохода. По результатам исследований ОАО ТКЗ «Красный котельщик» было выявлено, что основной причиной утонения стенок труб является интенсивная наружная коррозия металла, происходящая при наружной температуре стенки около 600°C, что значительно выше пре-



дельно допустимого значения по жаростойкости стали 12Х1МФ. Превышение температуры начинается при нагрузках котла более ~116,7 кг/с (420 т/ч).

4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления причин снижения показателей работы котла при сжигании природного газа на кафедре парогенераторостроения Южно-Российского государственного политехнического университета были проведены обширные расчетные исследования котла при сжигании мазута и природного газа, которые включали тепловые и гидравлические расчеты поверхностей нагрева^{6,7} [9, 21–24].

Основные результаты расчетов приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что тепловосприятие экранов топки при сжигании мазута значительно больше, чем при сжигании газа. Обусловлено это большей степенью черноты факела, что, соответственно, приводит к уменьшению температуры продуктов сгорания на выходе из топки. Расходы на впрыски при сжигании природного газа в ~ 10 раз больше, чем при сжигании мазута.

Причины повышенных впрысков при сжигании природного газа обусловлены

принятыми в проекте решениями по составу поверхностей нагрева котла. Как это принято в практике проектирования газомазутных котлов, основные технические решения по тепловой схеме котла (схема сжигания, состав поверхностей нагрева, зоны их размещения в потоке продуктов сгорания и включение по рабочему телу) принимаются по наиболее тяжелому топливу – мазуту.

Малые габариты топочной камеры предопределили установку в ней двух двусветных экранов для обеспечения заданной температуры продуктов сгорания на выходе из топки. Обычно в котлах высокого и сверхвысокого давления появляется необходимость в размещении на стенках топки настенного радиационного пароперегревателя, однако в котле ТГМЕ-444 это оказалось невозможным из-за малой поверхности стен топки, поэтому радиационный пароперегреватель выполнен в виде ширм площадью 140,5 м², включенных в объем топки. Малое тепловосприятие радиационного пароперегревателя потребовало развитых поверхностей конвективных пароперегревателей в опускном и подъемном газоходах (ширмоконвективных пароперегревателей).

Таблица 3

Основные результаты расчетов для существующей (проектной) схемы котла

Table 3

Main calculation results for existing (design) boiler circuit

Величина	Топливо	
	мазут	газ
Паропроизводительность, кг/с (т/ч)	139 (500)	139 (500)
Температура перегретого пара, °С	560	560
Давление перегретого пара за котлом, МПа	13,7	13,7
Адиабатическая температура горения, °С	2280	2028
Температура газов на выходе из топки, °С	1261	1355
Тепловосприятие топки, Дж/кг (ккал/кг)	20500 (4896)	13775 (3290)
Тепловосприятие экономайзера, Дж/кг (ккал/кг)	5736 (1370)	4551 (1087)
Суммарный расход собственного конденсата на впрыск, кг/с (т/ч)	4,0 (14,4)	41,2 (148,4)

В силу повышенного излучения факела при сжигании мазута генерация пара в паробразующих экранах¹⁰ D_B^M близка к номинальной паропроизводительности D . Поэтому на впрыск может быть использован расход, равный $d_k^M = D - D_B^M$.

При сжигании природного газа происходит перераспределение тепловосприятий между поверхностями топки и конвективной шахты. Из-за малой светимости факела тепловосприятие паробразующих экранов падает (и, следовательно, падает генерация пара в них D_B^r), а в конвективных поверхностях нагрева ШКПП (опускного и подъемного газоходов и экономайзера) растет. Это вызывает значительный рост приращения энтальпии в пароперегревателе и расходов на впрыски.

Расход генерируемого пара в водосодержащих поверхностях нагрева D_B определяется тепловосприятиями паробразующих экранов топки Q_L^B и экономайзера Q_K^B :

$$D_B = \frac{(Q_K^B + Q_L^B) B_p}{(i'' - i_{пв})}$$

Если учесть, что при переходе на сжигание газа Q_L^B уменьшается в значительно большей степени, чем увеличивается тепловосприятие экономайзера Q_K^B , то количество генерируемого в водосодержащих поверхностях пара D_B уменьшается, что приводит к росту расходов на впрыски. Пароперегреватель в этом случае должен не только перегревать пар, но и работать как парогенерирующая поверхность.

Чтобы снизить тепловосприятие пароперегревателя при сжигании природного газа, необходимо уменьшить пароперегревательные поверхности нагрева и одновременно увеличить тепловосприятие во-

досодержащих поверхностей.

Рассмотрим возможные направления решения поставленных задач.

5. НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

В паровом котле происходят процессы подогрева воды, превращения ее в пар и перегрева пара до заданной температуры. Теплоту, необходимую для подогрева и паробразования $Q_B^{потр}$ и перегрев пара $Q_{пе}^{потр}$, выразим с учетом расхода конденсата на впрыск d_k следующим образом [10]:

$$Q_B^{потр} = D(i'' - i_{пв}) - d_k \cdot r;$$

$$Q_{пе}^{потр} = D(i_{не} - i'') + d_k \cdot r.$$

Действительные тепловосприятия водосодержащих и пароперегревательных поверхностей нагрева в существующем котле определяются величинами их площадей и плотностями тепловых потоков:

$$Q_L^B = Q_L^B + Q_K^B; \quad Q_{пе}^B = Q_{пе}^B + Q_K^B,$$

где $Q_L^B = \bar{q}_L^B \cdot H_L^B$; $Q_{пе}^B = \bar{q}_{пе}^B \cdot H_{пе}^B$; $Q_K^B = \bar{q}_K^B \cdot H_K^B$; $Q_K^{пе} = \bar{q}_K^{пе} \cdot H_K^{пе}$ – радиационные и конвективные составляющие тепловосприятий водосодержащих и пароперегревательных поверхностей нагрева; \bar{q}_L^B , $\bar{q}_{пе}^B$ – средние плотности тепловых потоков на радиационных и конвективных водосодержащих и пароперегревательных поверхностях нагрева; H_K^B , $H_K^{пе}$ – площади радиационных и конвективных водосодержащих и пароперегревательных поверхностей нагрева.

При проектировании необходимо выдерживать соответствие потребной $Q_B^{потр}$, $Q_{пе}^{потр}$ и действительной Q_B^D , $Q_{пе}^D$ теплот

¹⁰Здесь и далее обозначения соответствуют [9].



на водосодержащих и пароперегревательных поверхностях нагрева.

Как видно из приведенных зависимостей, изменить $Q_{\text{в}}^{\text{потгр}}$ и $Q_{\text{пе}}^{\text{потгр}}$ можно, влияя на величину расходов на впрыски d_k , а на действительные тепловосприятия $Q_{\text{в}}^{\text{д}}$ и $Q_{\text{пе}}^{\text{д}}$ – изменением их поверхностей нагрева в топке и конвективных газоходах ($H_{\text{л}}^{\text{в}}$, $H_{\text{к}}^{\text{в}}$, $H_{\text{л}}^{\text{пе}}$, $H_{\text{к}}^{\text{пе}}$) и зон их расположения (влияя на средние плотности тепловых потоков $q_{\text{л}}^{\text{в}}$, $q_{\text{к}}^{\text{пе}}$).

Применительно к условиям решаемой задачи, когда изменение тепловой схемы котла не должно вызывать значительных капитальных затрат, геометрические размеры топки должны оставаться без изменения. Но состав поверхностей нагрева в топке (парообразующие экраны и пароперегревательные ширмы) может быть изменен в пределах существующей лучистой поверхности топки, поэтому влиять на действительные тепловосприятия $Q_{\text{к}}^{\text{д}}$, $Q_{\text{пе}}^{\text{д}}$ можно, изменяя только площади экономайзера и ШКПП, оставляя без изменения структуру радиационных поверхностей топки (первое направление изменения тепловой схемы), или изменять поверхности водосодержащих и пароперегревательных поверхностей как в топке, так и в конвективных газоходах (второе направление изменения тепловой схемы котла).

В существующем паровом котле, где впрыски доходят до 30% от номинальной паропроизводительности, теплота, отданная продуктами сгорания в конвективных пароперегревателях $Q_{\text{к}}^{\text{пе}}$ существенно больше теплоты, воспринятой экономайзером $Q_{\text{к}}^{\text{в}}$. Уменьшить расходы на впрыски, например, до 10% $D_{\text{ном}}$ можно снижением тепловосприятия конвективного пароперегревателя с 13009 Дж/кг (3107 ккал/кг) до 10409 Дж/кг (2486 ккал/кг). Для обеспечения таких показателей потребуются соответствующие изменения поверхностей ШКПП и экономайзера.

Практическую реализацию изменений тепловой схемы котла по указанным направлениям целесообразно проводить с учетом реальных возможностей изменения величин площадей поверхностей нагрева

как в конвективных газоходах, так и в топочной камере. Поэтому было рассмотрено несколько вариантов тепловых схем, сформированных с учетом возможностей их исполнения в существующих габаритах топки и конвективных газоходов котла и затратами на выполнение модернизации.

В качестве базового варианта рассмотрена исходная тепловая схема существующего котла по проекту ЦКТИ.

6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вариант 1 предусматривает отсутствие в подъемном газоходе ШКПП. При этом температура перед экономайзером увеличивается, что вызывает рост его тепловосприятия и, следовательно, увеличение генерации пара в водосодержащих поверхностях нагрева и снижение расхода на впрыски. В варианте 2 вместо ШКПП подъемного газохода устанавливается еще одна ступень экономайзера площадью 1000 м², что приводит к дальнейшему снижению расходов на впрыски.

Характерной особенностью варианта 3 является то, что в отличие от исходного варианта, в нем из пароперегревательного трата исключаются топочные ширмы. Они включаются в отдельный парообразующий циркуляционный контур. Вариант 4 подразумевает одновременно установку парообразующей топочной ширмы и ликвидацию ШКПП подъемного газохода. Установка парообразующей ширмы в топочной камере и замена ШКПП на дополнительную ступень экономайзера (вариант 5), как показали расчеты, приводит к избыточной генерации пара, сопровождаемой нулевым расходом на впрыски.

Включение в отдельный контур циркуляции ширмовых элементов опускного газохода (вариант 6) также снижает расходы на впрыски по сравнению с базовым. Дальнейшее увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева в варианте 7 за счет замены ШКПП на дополнительную ступень экономайзера приводит к невозможности обеспечения за-

данного значения температуры перегретого пара на номинальной нагрузке.

Результаты расчетов вариантов тепловых схем представлены в табл. 4.

Увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева и снижение расходов на впрыски приводят к уменьшению паросодержания на выходе из экономайзера, и в схемах с парообразующими ширмами возможен недогрев воды на его выходе, что увеличивает устойчивость работы экономайзера.

Однако с уменьшением расходов на впрыски наблюдается снижение диапазона регулируемых нагрузок котла вплоть до нуля (в вариантах 5 и 7). Расширить диапазон регулируемой нагрузки котла можно введением рециркуляции продуктов сгорания. Таким образом, если подать в топку газы рециркуляции в количестве 15%, то наименьшая регулируемая нагрузка в варианте 3 снизится до 270 т/ч, т.е. составит 54% от $D_{ном}$.

Следовательно, для существующего режима работы парового котла ТГМЕ-444 с единственным топливом – природным газом – существует возможность улучшения

его эксплуатационных показателей путем изменения тепловой схемы.

Следует отметить малую чувствительность к изменению тепловых схем температуры уходящих газов и горячего воздуха. Вероятно, это свойство принятой компоновки котла.

Наряду с необходимостью улучшения тепловой схемы парового котла, следует отметить назревшую необходимость пересмотра и его воздушного тракта. За 40 лет работы котла с воздухоподогревателями типа РВП-88 перетоки холодного воздуха всегда находились на высоком уровне [8, 9]. В последние годы их величина фиксировалась на уровне около 60%. Неоднократно предпринимавшиеся попытки снизить перетоки результатов не дали, поэтому в рамках исследования был рассмотрен вариант замены регенеративного воздухоподогревателя на трубчатый. Были выполнены вариантные тепловые расчеты котла. Рассматривались трубчатые воздухоподогреватели (ТВП) с трубами $\varnothing 51 \times 1,5$, $\varnothing 40 \times 1,5$ и $\varnothing 29 \times 1,5$ мм и различными значениями поверхности нагрева. В расчетах учитывалось, что при сжигании природного

Таблица 4

Результаты вариантных расчетов тепловых схем

Table 4

Calculation results of thermal circuit variants

Вариант	Паропроизводительность, кг/с (т/ч)	Температура перегретого пара, °С	Температура уходящих газов, °С	Температура горячего воздуха, °С	Суммарный расход на впрыск, кг/с (т/ч)	Минимальная регулируемая нагрузка, кг/с (т/ч)	Массовое паросодержание на выходе из экономайзера, %
Базовый	139 (500)	560	108	330	41,2 (148,4)	52,8 (190)	12,9
1	139 (500)	560	107	329	25,2 (90,8)	56,9 (205)	7,5
2	139 (500)	560	103	310	23,5 (84,7)	59,7 (215)	8,9
3	139 (500)	560	103	311	19,2 (69,1)	94,4 (340)	-12,4
4	139 (500)	560	104	314	4,1 (14,9)	118,1 (425)	-11,2
5	139 (500)	558	94	275	0 (0)	0 (0)	-1,7
6	139 (500)	560	101	303	11,9 (39,5)	97,2 (350)	-27,4
7	139 (500)	549	102	307	0 (0)	0 (0)	-24,4



газа температура горячего воздуха в соответствии с¹¹ должна быть на уровне 230°C, причем это значение не является фиксированным, а должно определяться термoeкономическим расчетом. Присосы холодного воздуха принимались равными 3%. В качестве основного ограничивающего фактора при выборе конструкции ТВП принята масса на уровне существующего РВП. Расчет варианта ТВП с трубами Ø40x1,5 мм показал, что при этом температура горячего воздуха снижается до 225°C, температура газов на выходе из топki снижается на 12°C, КПД котла брутто увеличивается на 2% вследствие снижения потерь тепла с уходящими газами.

Дальнейшее повышение показателей эффективности возможно только с учетом работы паросилового блока в целом. Могут быть рассмотрены варианты, при реализации которых возможно снижение температуры уходящих газов за счет установки турбинного экономайзера (ТЭК). В этом случае тепловая мощность парового котла складывается из двух составляющих:

$$Q_{\text{ПК}} = Q_{\text{ПК}}^{\text{ВД}} + Q_{\text{ПК}}^{\text{ТЭК}},$$

где $Q_{\text{ПК}}^{\text{ВД}} = Q_{\text{в}}^{\text{потр}} + Q_{\text{пе}}^{\text{потр}}$ – тепловосприятие пароводяного тракта котла; $Q_{\text{ПК}}^{\text{ТЭК}}$ – тепловосприятие турбинного экономайзера.

Включение в схему котла ТЭК может рассматриваться в двух вариантах:

1) тепловосприятие пароводяного тракта котла остается неизменным и введение ТЭК приводит к более глубокой утилизации тепла уходящих газов. При рассмотрении данного варианта необходимо учитывать не только повышение КПД котла за счет снижения температуры уходящих газов, но и увеличение выработки электроэнергии за счет уменьшения отбора пара из цилиндра высокого давления, а также снижение эффективности цикла в целом за счет увеличения расхода рабочего тела через конденсатор;

2) тепловосприятие пароводяного

тракта котла уменьшается, а тепловосприятие турбинного экономайзера увеличивается. Таким образом, возможен поиск оптимального соотношения $Q_{\text{ПК}}^{\text{ВД}}$ и $Q_{\text{ПК}}^{\text{ТЭК}}$ по критерию максимальной эффективности работы блока в целом;

3) тепловая мощность котла увеличивается до допустимых с точки зрения надежности работы экранов топki и температурного режима наиболее напряженных пароперегревательных поверхностей нагрева. В этом случае в турбинный экономайзер направляется часть потока питательной воды, и он работает параллельно с группой подогревателей высокого давления.

Дополнительный положительный эффект может дать установка теплообменника, в котором подогревается вода для тепловой сети (теплофикационный экономайзер). В этом случае можно добиться более глубокого охлаждения уходящих газов, вплоть до температуры, близкой к температуре точки росы. Эффективность возможных вариантов должна также оцениваться с учетом экономических показателей работы станции в целом.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы и рекомендации по изменению тепловой схемы котла.

1. Изменением конструкции и тепловосприятия пароперегревательных поверхностей нагрева котла можно добиться значительного снижения расходов на впрыски, снизить тепловую разверку и повысить надежность их работы с сохранением высокого уровня экономических показателей.

2. Наибольший эффект снижения расходов на впрыски достигается в случаях, когда пароперегревательные топочные ширмы заменяются на парообразующие с включением их в схему циркуляции котла.

3. Увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева за счет перевода пароперегревательных

¹¹Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е. НПО ЦКТИ – ВТИ. СПб, 1998. 256 с.

ширм в топке в парообразующие приводит к увеличению недогрева воды на выходе из экономайзера, что повышает устойчивость его работы.

4. Снижение диапазона регулируемой нагрузки котла при увеличении тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева (при снижении расхода на впрыски) можно компенсировать введением в топку газов рециркуляции, отбираемых после экономайзера.

5. Перспективным для дальнейшей проработки следует признать схемы котла с введением в конвективные газоходы теплофикационных или турбинных экономайзеров, а также поверхностей нагрева, охлаждаемых рабочей средой с пониженным уровнем давления. Целесообразность их применения должна определяться с учетом их влияния на экономические показатели работы ТЭЦ-2 в целом.

Библиографический список

1. Клер А.М., Потанина Ю.М., Епишкин Н.О. Оптимизация угольных энергоблоков на суперсверхкритические параметры пара по критериям максимума энергетической и экономической эффективности // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла: материалы II Между-нар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 28–29 октября 2014 г.). М.: Изд-во ВТИ, 2014. С. 100–106.
2. Жуков Е.Б., Меняев К.В., Таймасов Д.Р. Совместное сжигание кородеревесных отходов и угля в малой и средней энергетике // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 2–3 октября 2018 г.). М.: Изд-во ВТИ, 2018. С. 174–179.
3. Голованов Н.В., Иванов В.А., Попов А.А. [и др.]. Новая конструкция парогенератора для газомазутных ТЭЦ // Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. С. 49–58.
4. Голованов Н.В., Митор В.В., Назаренко В.С. Итоги освоения и исследования головного малогабаритного парогенератора Е-500-140 ГМВН на Ростовской ТЭЦ-2 // Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. С. 59–73.
5. Голованов Н.В., Митор В.В. Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ // Труды ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1975. Вып. 132. С. 3–14.
6. Голованов Н.В. Малогабаритные парогенераторы с вихревой топкой ЦКТИ. Особенности конструкции и эксплуатации. Перспективы применения // Труды ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. Вып. 154. С. 3–13.
7. Ицковский М.А. Создание и освоение опытно-промышленных и серийных котлов с вихревыми топками // Труды ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 2002. Вып. 159. С. 127–138.
8. Рокачев Г.И., Голубых А.К., Тасс О.А., Гильде Е.Э. Итоги эксплуатации малогабаритных котлов Е-500-140 ГМВН на Ростовской ТЭЦ-2 // Теплоэнергетика. 1999. № 11. С. 14–19.
9. Безгрешнов А.Н., Белов А.А., Озеров А.Н., Усиков Н.В., Дьяконов Е.М., Баранников А.Е. [и др.]. Выбор профиля реконструкции парового котла ТГМЕ-444 Ростовской ТЭЦ-2 // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 15–21.
10. Паршин А.А., Митор В.В., Безгрешнов А.Н., Шлейфер Б.М., Петров В.В., Христин Л.М. Тепловые схемы котлов. М.: Машиностроение, 1987. 221 с.
11. Липов Ю. М., Третьяков Ю. М. Котельные установки и парогенераторы. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. 592 с.
12. Голованов Н.В., Попов А.А., Кухно А.А., Малютин М.Р., Барботько И.В., Королевский Г.В. [и др.]. Наладка и исследование вихревой топкой МПГ Е-500 ВН // Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. С. 3–16.
13. Чавчанидзе Е.К., Сергеев Н.В., Чураков М.А., Королевский Г.В., Рокачев Г.И., Сергиевский Н.В. Наладка и исследование радиационного пароперегревателя из цельносварных ширм МПГ Е-500 ВН // Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. С. 52–58.
14. Красинский Д.В., Рычков А.Д., Саломатов В.В. Математическое моделирование трехмерного турбулентного течения в вихревой топке парогенератора // Вычислительные технологии. 1995. Т. 4. № 12. С. 189–198.
15. Annaratone D. Steam Generators. Description and Design. Milano: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 434 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://book2.org/ireader/686861> (24.03.2019).
16. Ganapathy V. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators. Design, Applications, and Calcula-



tions. New York: Marcel Dekker, 2003. 579 p.

17. Кали Б. Анализ возможностей совершенствования тепловой схемы и повышения эффективности работы энергоблока 110 МВт с котлоагрегатом ТГМЕ-464 // Энергетика, радиотехника, электроника и связь. Теплоэнергетика. Алматы: АУЭС, 2017. С. 20–25.

18. Mertens N., Alobaid F., Starkloff R., Epple B., Kim H.-G. Comparative investigation of drum-type and once-through heat recovery steam generator during start-up // *Applied Energy*. 2015. Vol. 144. P. 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.065>

19. Walter H., Linzer W., Schmid T. Dynamic flow instability of natural circulation heat recovery steam generators // *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena* (Prague, 1 August 2005). Prague; 2005. P. 1–11.

20. Mertens N., Alobaid F., Lanz T., Epple B., Kim H.-G. Dynamic simulation of a triple-pressure combined-cycle plant: Hot start-up and shutdown // *Fuel*. 2016. Vol. 167. P. 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.055>

21. Безгрешнов А.Н., Белов А.А., Баранников А.Б., Озеров А.Н., Дьяконов Е.М. Исследование гидродинамики пароперегревательного тракта котла ТГМЕ-444 // Повышение эффективности производства

электроэнергии: материалы IV Междунар. конф. (г. Новочеркасск, 14–17 октября 2003 г.). Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2003. С. 46–48.

22. Баранников А.Б., Дьяконов Е.М., Вершинин Л.Б., Безгрешнов А.Н., Озеров А.Н., Усиков Н.В. Исследование тепловой схемы котла ТГМЕ-444 Ростовской ТЭЦ-2 с целью повышения надежности его работы // *Кибернетика электрических систем: материалы XXVI сессии Всерос. семинара «Диагностика энергооборудования»*: в 2 ч. (г. Новочеркасск, 21–24 сентября 2004 г.). Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2004. Ч. 2. С. 51–55.

23. Безгрешнов А.Н., Вершинин А.Б., Дьяконов Е.М., Михалев Д.Л. Выбор тепловой мощности котла ТГМЕ-444 при его реконструкции // Повышение эффективности производства электроэнергии: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Новочеркасск, 14–17 октября 2003 г.). Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2005. С. 77–79.

24. Безгрешнов А.Н., Дьяконов Е.М., Павлова Л.А. Исследование возможности перевода котла ТГМЕ-444 РТЭЦ-2 на работу с впрыском питательной воды // *Известия вузов. Электромеханика*. 2008. С. 195–196.

References

1. Kler AM, Potanina YuM, Epishkin NO. Coal power unit optimization for steam supercritical parameters according to the criteria of maximum energy and economic efficiency. In: *Ispol'zovanie tverdyh topliv dlya effektivnogo i ekologicheskogo proizvodstva elektroenergii i tepla: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* = Using solid fuels for efficient and environmentally friendly production of electric energy and heat: Proceedings of II International scientific and technical conference. 28–29 October 2014, Moscow. Moscow: All-Russia Thermal Engineering Institute; 2014, p. 100–106. (In Russ.)

2. Zhukov EB, Menyayev KV, Tajmasov DR. Combined burning of bark and wood wastes and coal in small and medium-sized energy. In: *Ispol'zovanie tverdyh topliv dlya effektivnogo i ekologicheskogo proizvodstva elektroenergii i tepla: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* = Using solid fuels for efficient and environmentally friendly production of electric energy and heat: Proceedings of II International scientific and technical conference. 2–3 October 2018, Moscow. Moscow: All-Russia Thermal Engineering Institute; 2018, 174–179. (In Russ.)

3. Golovanov NV, Ivanov VA, Popov AA, et al. New design of a steam generator for gas-oil thermal power plants. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI. (eds.). *Osvoenie i issledovanie golovnyh malogabaritnyh parogeneratorov s vihrevoj topkoj* = Implementation and research of small-sized main steam generators with a vortex furnace. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, p. 49–58. (In Russ.)

4. Golovanov NV, Mitor VV, Nazarenko VS. Results of

the development and research of a small-sized head steam generator E-500-140 GMVN at Rostov TPP-2. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI. (eds.). *Osvoenie i issledovanie golovnyh malogabaritnyh parogeneratorov s vihrevoj topkoj* = Implementation and research of small-sized main steam generators with a vortex furnace. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, p. 59–73. (In Russ.)

5. Golovanov NV, Mitor VV. Development and research of small-sized head steam generators with a vortex furnace of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI (eds.). *Trudy CKTI* = Proceedings of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1975, issue 132, p. 3–14. (In Russ.)

6. Golovanov NV. Small-sized steam generators with a vortex furnace of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Design and operation features. Application prospects. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI (eds.). *Trudy CKTI* = Proceedings of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, issue 154, p. 3–13. (In Russ.)

7. Ickovskij MA. Creation and development of pilot industrial and serial boilers with vortex furnaces. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI (eds.). *Trudy CKTI* = Proceedings of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 2002, issue 159, p. 127–138. (In Russ.)

8. Rokachev GI, Golubyh AK, Tass OA, Gil'de EE. Re-

sults of E-500-140 GMVN small-sized boilers operation at Rostov CHP-2. *Теплоэнергетика* = Thermal Engineering. 1999;11:14–19. (In Russ.)

9. Bezgreshnov AN, Belov AA, Ozerov AN, Usikov NV, D'yakonov EM, Barannikov AB, et al. Selecting a retrofitting profile for the TGME-444 boiler at the Rostov TETs-2 cogeneration station. *Теплоэнергетика* = Thermal Engineering. 2009;6:15–21. (In Russ.)

10. Parshin AA, Mitor VV, Bezgreshnov AN, Shleifer BM, Petrov VV, Hristich LM. *Boiler thermal diagrams*. Moscow: Mashinostroenie; 1987, 221 p. (In Russ.)

11. Lipov YuM, Tretyakov YuM. *Boiler plants and steam generators*. Moscow–Izhevsk: Research Center 'Regular and chaotic dynamics'; 2003, 592 p. (In Russ.)

12. Golovanov NV, Popov AA, Kuhno AA, Malyutin MR, Barbot'ko IV, Korolevskij GV, et al. Adjustment and study of MPG E-500 VN vortex furnace. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI (eds.). *Osvoenie i issledovanie golovnyh malogabaritnyh parogeneratorov s vihrevoj topkoj* = Implementation and research of small-sized main steam generators with a vortex furnace. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, p. 3–16. (In Russ.)

13. Chavchanidze EK, Sergeev NV, Churakov MA, Korolevskij GV, Rokachev GI, Sergievskij NV. Adjustment and research of MPG E-500 NVN all-welded screen radiation superheater. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI (eds.). *Osvoenie i issledovanie golovnyh malogabaritnyh parogeneratorov s vihrevoj topkoj CKTI* = Implementation and research of small-sized main steam generators with a vortex furnace. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, p. 52–58. (In Russ.)

14. Krasinskij DV, Rychkov AD, Salomatov VV. Mathematical modeling of three-dimensional turbulent flow in a steam generator vortex furnace. *Vychislitel'nye tekhnologii* = Computational Technologies. 1995;4(12):189–198. (In Russ.)

15. Annaratone D. *Steam Generators. Description and Design*. Milano: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2008, 434 p. Available from: <https://book2.org/ireader/686861> [Accessed 24th March 2019].

16. Ganapathy V. *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators. Design, Applications, and Calculations*. New York: Marcel Dekker; 2003, 579 p.

17. Kali B. Analyzing possibilities to improve thermal circuit and increase operation efficiency of a 110 MW power unit with a TGME-464 boiler. In: *Energetika, radiotekhnika, elektronika i svyaz'. Теплоэнергетика* = Power Engineering, Radio Engineering, Electronics and Communications. Heat Power Engineering. Almaty: Almaty University of Power Engineering and Telecom-

munications; 2017, p. 20–25.

18. Mertens N, Alobaid F, Starkloff R, Epple B, Kim H-G. Comparative investigation of drum-type and once-through heat recovery steam generator during start-up. *Applied Energy*. 2015;144:250–260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.065>

19. Walter H, Linzer W, Schmid T. Dynamic flow instability of natural circulation heat recovery steam generators. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena*. 1 August 2005, Prague. Prague; 2005, p. 1–11.

20. Mertens N, Alobaid F, Lanz T, Epple B, Kim H-G. Dynamic simulation of a triple-pressure combined-cycle plant: Hot start-up and shutdown. *Fuel*. 2016;167:135–148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.055>

21. Bezgreshnov AN, Belov AA, Barannikov AB, Ozerov AN, D'yakonov EM. Studying hydrodynamics of TGME-444 boiler superheat path. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva elektroenergii: materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii* = Improving efficiency of electric energy production: Materials of IV International Conference. 14–17 October 2003, Novochoerkassk. Novochoerkassk: Platov South Russian State Polytechnic University; 2003, p. 46–48. (In Russ.)

22. Barannikov AB, D'yakonov EM, Vershinin LB, Bezgreshnov AN, Ozerov AN, Usikov NV. Studying thermal circuit of Rostov TPP-2 TGME-444 boiler in order to increase its operation reliability. In: *Kibernetika elektricheskikh sistem: materialy XXVI sessii Vserossijskogo seminara "Dagnostika energooborudovaniya"* = Cybernetics of electrical systems: Materials of XXVI session of the All-Russian seminar "Diagnostics of power equipment". 21–24 September 2004, Novochoerkassk. Novochoerkassk: Platov South Russian State Polytechnic University; 2004, part. 2, p. 51–55. (In Russ.)

23. Bezgreshnov AN, Vershinin AB, D'yakonov EM, Mihalev DL. Choosing thermal power of TGME-444 boiler under its reconstruction. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva elektroenergii: materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii* = Improving efficiency of electric energy production: Materials of IV International scientific and technical conference. 14–17 October 2003, Novochoerkassk. Novochoerkassk: Platov South Russian State Polytechnic University; 2003, p. 77–79. (In Russ.)

24. Bezgreshnov AN, D'yakonov EM, Pavlova LA. Studying the possibility to switch Rostov CHP-2 TGME-444 boiler into feedwater injection operation. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* = Russian Electromechanics. 2008;195–196. (In Russ.)

Критерии авторства

Усиков Н.В., Дьяконов Е.М. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Usikov N.V., Dyakonov E.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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Усиков Николай Васильевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры тепловых электрических станций
и теплотехники,
Южно-Российский государственный
политехнический университет им. М.И. Платова,
346428, г. Новочеркасск,
ул. Просвещения, 132, Россия;
✉ e-mail: usikovnw@rambler.ru

Дьяконов Евгений Михайлович,

кандидат технических наук, доцент,
и. о. заведующего кафедрой тепловых
электрических станций и теплотехники,
Южно-Российский государственный
политехнический университет им. М.И. Платова,
346428, г. Новочеркасск,
ул. Просвещения, 132, Россия;
e-mail: deml@rambler.ru

Conflict of interests

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay V. Usikov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Thermal Power Stations and Heat Engineering,
Platov South Russian State Polytechnic University,
132, Prosveshcheniya St.,
Novocherkassk 346428, Russia;
✉ e-mail: usikovnw@rambler.ru

Evgeniy M. Dyakonov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Acting Head of the Department of Thermal Power
Stations and Heat Engineering,
Platov South Russian State Polytechnic University,
132, Prosveshcheniya St.,
Novocherkassk 346428, Russia;
e-mail: deml@rambler.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.1:621.372

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-318-332>

Анализ возможности применения активных фильтров для снижения несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения одного из угольных карьеров Вьетнама

Буй Нгок Хунг*, Л.И. Коверникова*,**

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

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

Резюме: Цель – обоснование применения активного фильтра гармоник для снижения несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения одного из угольных карьеров Вьетнама. Системы электроснабжения угольных шахт и карьеров имеют много уровней напряжения, различных типов нагрузок. Новое электрооборудование работает параллельно с оборудованием, которое морально и физически устарело. В угольных шахтах и карьерах имеются нагрузки большой мощности с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Они вносят искажения в электрическую сеть. Поэтому для систем электроснабжения промышленных районов с добычей угля характерно качество электрической энергии, не соответствующее требованиям нормативных документов Вьетнама. Низкое качество электрической энергии вызывает дополнительный экономический ущерб. Для повышения качества электрической энергии необходимо применение специальных технических средств, одним из которых являются активные фильтры гармоник. Оценка качества электрической энергии в системе электроснабжения угольного карьера выполнена инструментальным методом прибором PQ-Vox150 для измерения показателей качества электрической энергии и параметров режима. Проведен анализ измеренных показателей качества электрической энергии и параметров несинусоидального режима. Результаты анализа показателей, характеризующих степень искажения формы кривой напряжения, свидетельствуют о превышении ими предела, установленного в нормативных документах Вьетнама. Результаты анализа измеренных параметров несинусоидального режима свидетельствуют также о наличии широкого спектра интергармоник напряжения и тока. Проведен анализ режима реактивной мощности на основной частоте. Анализ показал, что коэффициент мощности нагрузки в одной из фаз меньше значения, установленного в нормативных документах Вьетнама. На основании анализа результатов измерений показателей качества электрической энергии и параметров несинусоидального режима величин коэффициента мощности нагрузки и реактивной мощности основной частоты, характеристик активных фильтров гармоник принято решение о возможности применения активного фильтра гармоник для снижения несинусоидальности напряжения и повышения коэффициента мощности нагрузки в системе электроснабжения угольного карьера.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несинусоидальный режим, гармоники, интергармоники, измерения, система электроснабжения

Информация о статье: Дата поступления 11 октября 2019 г.; дата принятия к печати 28 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Буй Нгок Хунг, Коверникова Л.И. Анализ возможности применения активных фильтров для снижения несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения одного из угольных карьеров Вьетнама. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 318–332. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-318-332>

The applicability of active filters for reduction of voltage non-sinusoidality in the power supply system of a coal mine in Vietnam

Bui Ngoc Hung*, Lidia I. Kovernikova*,**

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, Russia

Abstract: The study is aimed at the provision of an underlying rationale for the use of active filters to reduce voltage non-sinusoidality in the power supply system of a coal mine in Vietnam. Power supply systems of coal mines and quarries are characterised by many voltage levels and various types of loads, with new electrical equipment working in parallel with outdated equipment. Coal mines and quarries are maintained under high power loads, with non-linear current-voltage characteristics introducing distortion into the electrical network. Therefore, power supply systems for industrial coal mining areas are determined by a quality of electric energy that is inconsistent with Vietnamese regulatory requirements. Additional economic damage is caused by low quality of electric energy. In order to improve the quality of electric energy, it is necessary to apply special technical means, such as active harmonic filters. The quality assessment of electric energy in the coal mine power supply system was carried out using the PQ-Box150 instrument for measuring electric energy quality indicators and mode parameters. An analysis of the measured quality indicators of electric energy is conducted, including the parameters of non-sinusoidal mode. For indicators characterising the distortion degree of the voltage curve shape, the results of the analysis indicate them to exceed the limit established in the regulatory documents of Vietnam. From the analysis of measured parameters in non-sinusoidal mode, the presence of a wide range of voltage and current interharmonics is also detected. According to the analysis of the reactive power mode at the fundamental frequency, the load power factor in one of the phases is established to be less than the minimum value given in the Vietnamese regulatory documents. In accordance with the measurement results of electric energy quality indicators and parameters of the non-sinusoidal mode of the load power factor and reactive power of the fundamental frequency, as well as characteristics of active harmonic filters, the application of an active harmonic filter was demonstrated to be appropriate for reducing voltage non-sinusoidality and increasing the load power factor in the power supply system of a coal mine.

Keywords: quality of electrical energy, non-sinusoidal mode, harmonics, interharmonics, measurements, power supply system

Information about the article: Received October 11, 2019; accepted for publication February 28, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Bui Ngoc Hung, Kovernikova LI. The applicability of active filters for reduction of voltage non-sinusoidality in the power supply system of a coal mine in Vietnam. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):318–332. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-318-332>

1. ВВЕДЕНИЕ

Добыча угля во Вьетнаме является одной из важнейших отраслей экономики. Системы электроснабжения угольных шахт и карьеров сложные, сочетают в себе многообразие уровней напряжения, различные типы нагрузок. Новое электрооборудование обычно используется параллельно с оборудованием, которое морально и физически устарело. В угольных шахтах и карьерах имеются нагрузки большой мощности, в т.ч. нелинейные, вносящие искажения в электрическую сеть, и, таким образом, ухудшающие качество электрической энергии. Для систем электроснабжения промышленных районов Вьетнама, где производится добыча угля, характерно низкое

качество электрической энергии.

В России степень искажения формы кривой напряжения ограничена нормативными значениями, установленными для показателей K_U и $K_{U(n)}$ в соответствии с ГОСТ 32144-2013¹. Во Вьетнаме нормативные значения установлены как для показателей, характеризующих искажение формы кривой напряжения, так и тока в циркуляре № 39² и № 25³.

В статье приведены результаты выполненного анализа схемы системы электроснабжения одного из угольных карьеров Вьетнама, его нагрузок, качества электрической энергии на основе измерений показателей качества электрической энергии и параметров режимов гармоник, проведенного анализа характеристик активных

¹ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. межгосударственным советом по стандартизации 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014.

²Циркуляр № 39/2015/ТТ-ВСТ от 18.11.2015. Введ. министерством промышленности и торговли Вьетнама по распределению электрической энергии. Вьетнам, 2015.

³Циркуляр № 25/2016/ТТ-ВСТ от 30.11.2016. Введ. министерством промышленности и торговли Вьетнама по передаче электрической энергии. Вьетнам, 2016.



фильтров, которые могут быть использованы для улучшения качества электрической энергии в угольном карьере.

2. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНОГО КАРЬЕРА

Схема электроснабжения угольного карьера приведена на рис. 1, где показано, что электроснабжение карьера выполняется от двухтрансформаторной подстанции 110 кВ, которая питается от двух независимых источников по линиям электропередачи 110 кВ. Один из трансформаторов является рабочим, второй – резервным. На низкой стороне трансформаторов имеются две секции шин 22 кВ (узлы 6604 и 6643). Угольный карьер получает электрическую энергию от секции шин 22 кВ (узел 6643)

через понижающий трансформатор 22/0,4 кВ. Уголь добывается экскаватором и с помощью конвейеров направляется для переработки на сортировочный комбинат. Сортировочный комбинат имеет два цеха: сортировки угля и цех электроводоснабжения. Общая длина линий электропередачи всех напряжений (110, 22 и 0,4 кВ) около 60 км. К шинам 0,4 кВ присоединены источники реактивной мощности – конденсаторные батареи мощностью 450 кВ·Ар (здесь р – реактивный).

Сортировочный комбинат имеет различное технологическое оборудование – вибраторы, дробилки, конвейеры, лебедки, насосы и т.д. Большая часть этого оборудования приводится в действие асинхронными двигателями, мощность которых находится в диапазоне от 4 до 185 кВт.

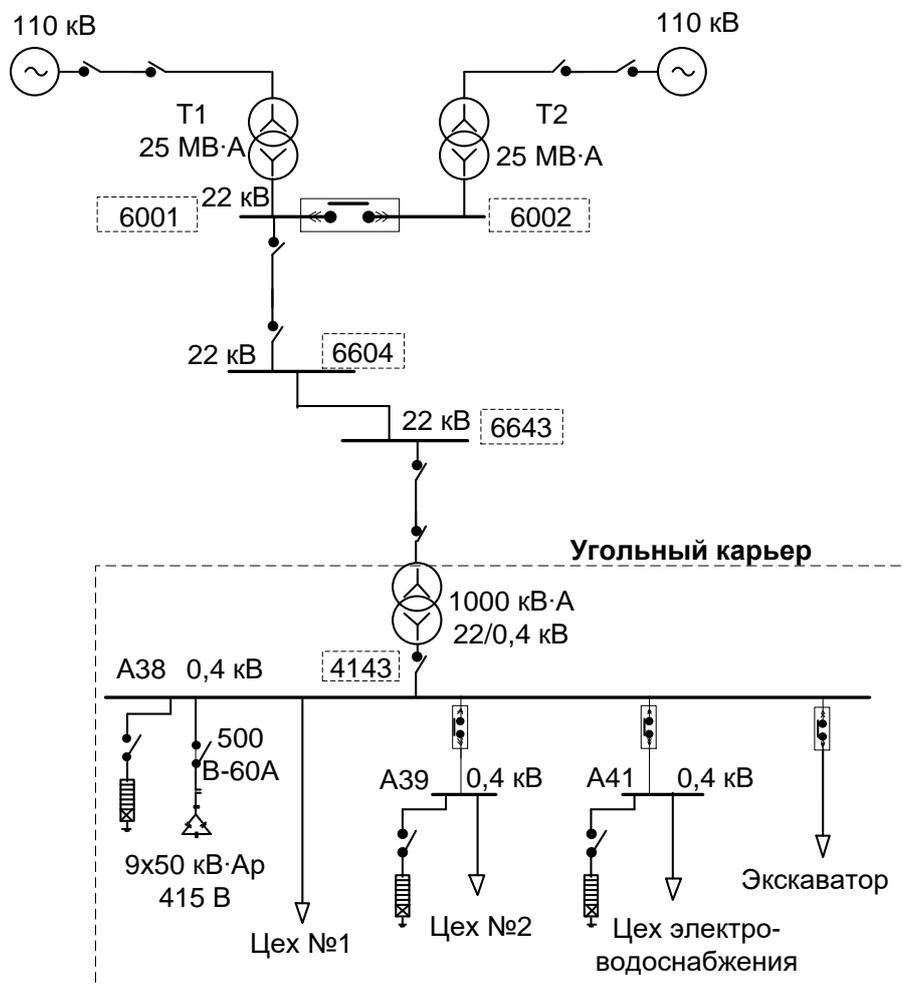


Рис. 1. Схема системы электроснабжения угольного карьера
Fig. 1. Diagram of a power supply system of a coal pit

Переработка угля заключается в сортировке угольных кусков по крупности с помощью вибрационных сит. В сортировочном цехе № 1, технологический процесс переработки угля которого приведен на рис. 2, где d – диаметр кусков угля, имеется 17 ед. электрооборудования. Мощность электродвигателей лежит в диапазоне от 4 до 50 кВт. Цех работает с 7 ч утра до 17 ч вечера. С 17 ч до 7 ч следующего дня в цехе перерыв, и основное технологическое оборудование не работает. В это время в рабочем состоянии находится только электрооборудование цеха электроводоснабжения.

В сортировочном цехе № 2 продолжается переработка угля. В технологическом процессе участвует 18 ед. электрооборудования с асинхронными двигателями мощностью от 4 до 185 кВт. Рабочий день сортировочного цеха № 2 также продолжается непрерывно с 7 ч утра до 17 ч вечера. После 17 ч в работе остаются водяные насосы и мешалки, продолжающие специальный технологический процесс.

Цех электроводоснабжения, осуществляющий освещение сортировочных цехов, подачу воды для сортировочного комбината, транспортировку угля на склад имеет 23 ед. электрооборудования, мощность электродвигателей которого лежит в

диапазоне от 4 до 160 кВт.

На сортировочном комбинате используются главным образом асинхронные двигатели с частотным регулированием. На рис. 3 приведена схема питания асинхронного двигателя (АД).

Асинхронный двигатель с частотным регулированием потребляет несинусоидальный ток. Он является нелинейной нагрузкой, т.е. источником гармоник и интергармоник тока, вызывающим ухудшение качества электрической энергии. Для оценки качества электрической энергии были проведены измерения показателей качества электрической энергии и параметров несинусоидального режима. Результаты измерений приведены ниже.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Измерения были выполнены прибором PQ-Vox150, произведенным в Германии. Они проводились со стороны низкого напряжения понижающего трансформатора 22/0,4 кВ в узле 4143 в течение 24 ч с интервалом измерений показателей и параметров режима 1 с.

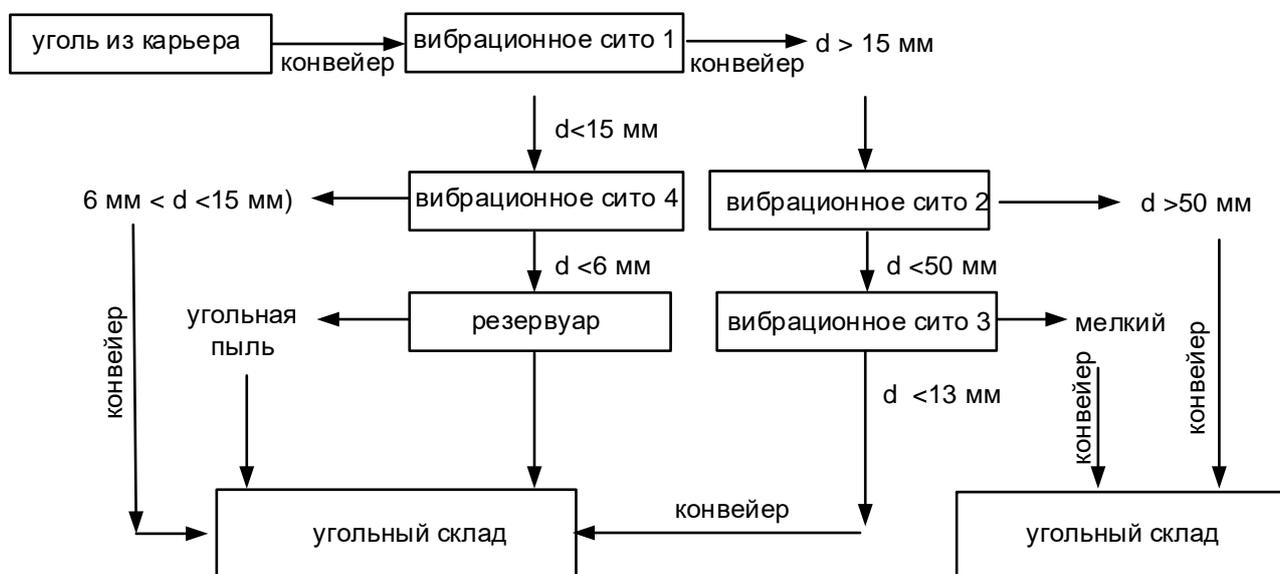


Рис. 2. Технологический процесс сортировочного цеха № 1
Fig. 2. Technological process of the sorting shop no. 1

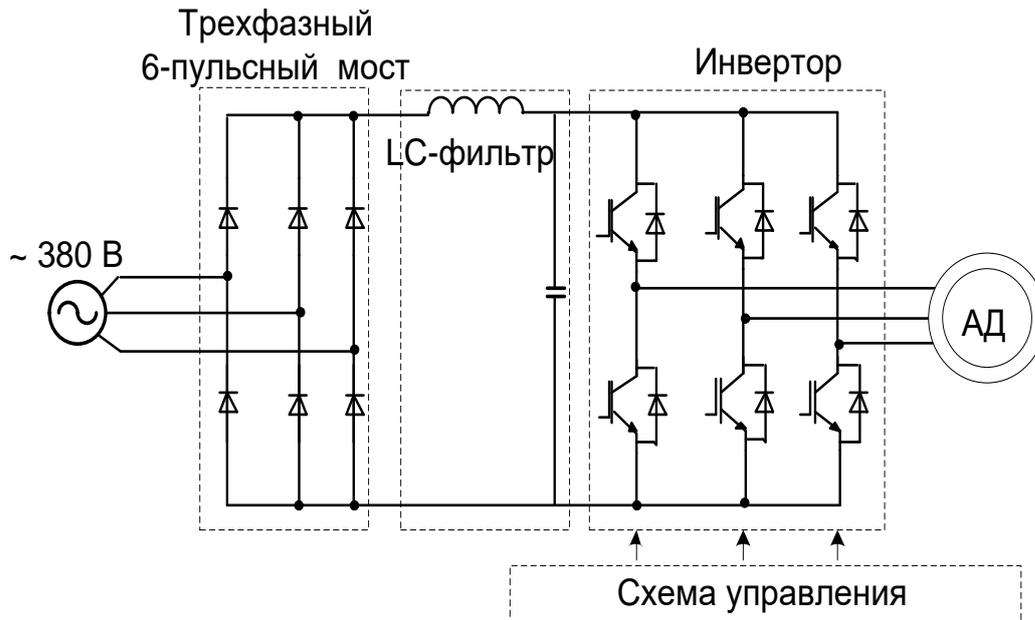


Рис. 3. Схема асинхронного двигателя с частотным регулированием
Fig. 3. Diagram of induction motor with frequency control

Результаты измерений активной и реактивной мощностей. На рис. 4 приведены кривые изменения величин активной (P) и реактивной (Q) мощностей в трех фазах, потребленных нагрузкой угольного карьера за 24 ч измерений. Максимальное потребление активной мощности составило 1035 кВт, реактивной – 419 кВ·Ар. В ночное время в работе находится электрооборудование, потребляющее 203 кВт активной мощности и 94 кВ·Ар реактивной мощности.

В табл. 1 приведены статистические оценки величин реактивных мощностей и

$\cos\varphi$ в рабочее время и во время перерыва в работе. В табл. 1–9 «max» и «min» – максимальное и минимальное значения, МО – математическое ожидание. Из табл. 1 следует, что, несмотря на использование для компенсации реактивной мощности установленных конденсаторных батарей мощностью 450 кВ·Ар, среднее значение коэффициента мощности в фазе В равно 0,83, что меньше нормативного значения 0,85, установленного в циркуляре № 39. По этой причине каждый месяц компания, владеющая карьером, вынуждена платить штраф.

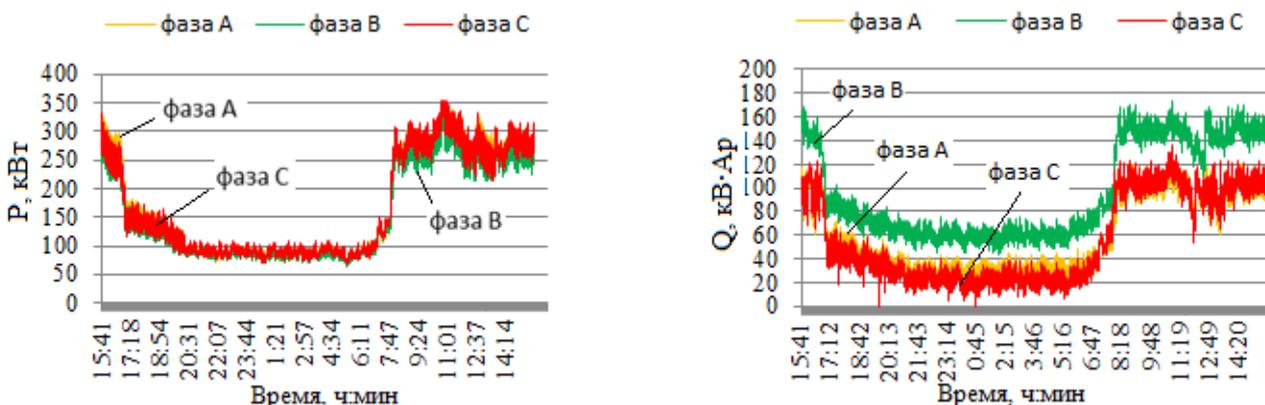


Рис. 4. Суточные графики потребления активной (P) и реактивной (Q) мощностей
Fig. 4. Daily schedules of active (P) and reactive (Q) power consumption

Таблица 1

Статистическая оценка величин реактивных мощностей и $\cos\varphi$

Table 1

Statistical evaluation of reactive power and $\cos\varphi$

Значение	Рабочее время						Время перерыва					
	Фаза А		Фаза В		Фаза С		Фаза А		Фаза В		Фаза С	
	Q, кВ·Ар	$\cos\varphi_A$	Q, кВ·Ар	$\cos\varphi_B$	Q, кВ·Ар	$\cos\varphi_C$	Q, кВ·Ар	$\cos\varphi_A$	Q, кВ·Ар	$\cos\varphi_B$	Q, кВ·Ар	$\cos\varphi_C$
Max	27,1	0,97	173	0,91	136	0,97	71,5	0,98	102,7	0,92	64,9	0,99
Min	28,6	0,89	67	0,77	29	0,89	14,9	0,89	43,7	0,72	0,0	0,91
МО	94,5	0,94	140	0,83	96,8	0,93	34,9	0,94	65,9	0,81	28,2	0,96
Норма	–	$\geq 0,85$	–	$\geq 0,85$	–	$\geq 0,85$	–	$\geq 0,85$	–	$\geq 0,85$	–	$\geq 0,85$

Результаты измерений гармоник напряжения. На рис. 5 приведена диаграмма коэффициентов n -х гармонических составляющих напряжения для режимов минимальных ($K_{U(n)min}$) и максимальных ($K_{U(n)max}$) нагрузок.

Для большинства гармоник величины $K_{U(n)}$ в режиме максимальных нагрузок превышают значения в режиме минимальных нагрузок.

На рис. 6 приведен график изменения величины суммарного коэффициента гармоник напряжения K_U в фазе А, а также его нормативное значение K_{UH} . Из рис. 4 очевидно, что большинство измеренных значений K_U превышает нормативное значение 6,5%, установленное в циркуляре № 39. Наибольшее значение K_U составляет

16,7%; наименьшее – 3,8%; среднее – 9,2%.

В табл. 2 и 3 приведены статистические оценки $K_{U(n)}$ в фазе А для рабочего времени и времени перерыва в работе. Превышения нормативного значения для $K_{U(n)}$ равного 3% имеют место для 5 и 7 гармоник, источниками которых являются трехфазные 6-пульсные схемы выпрямления, питающие асинхронные двигатели с частотным регулированием.

На рис. 7 приведены графики изменения измеренных коэффициентов $K_{U(5)}$ и $K_{U(7)}$ в фазе А, из которых видно, что величины $K_{U(5)}$ и $K_{U(7)}$ значительную часть времени измерений превышают нормативное значение 3%, установленное в циркуляре № 39. Наибольшие значения они имеют во время перерыва в работе.

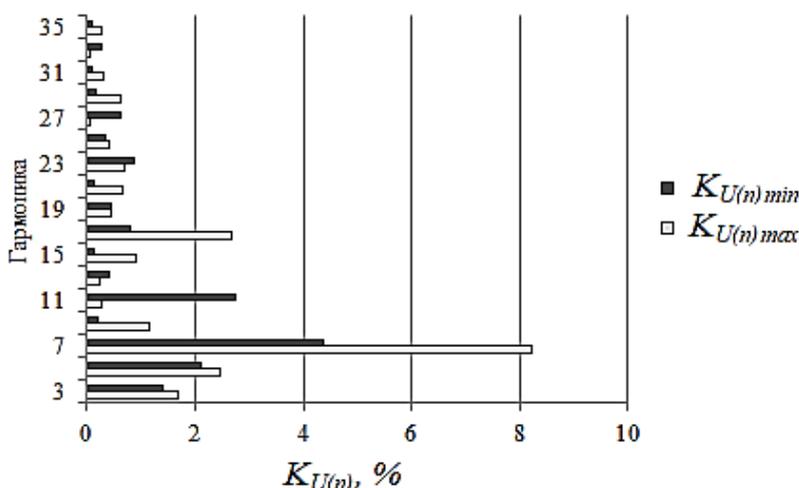


Рис. 5. Диаграмма гармоник напряжения в фазе А
 Fig. 5. Diagram of voltage harmonics in the phase A

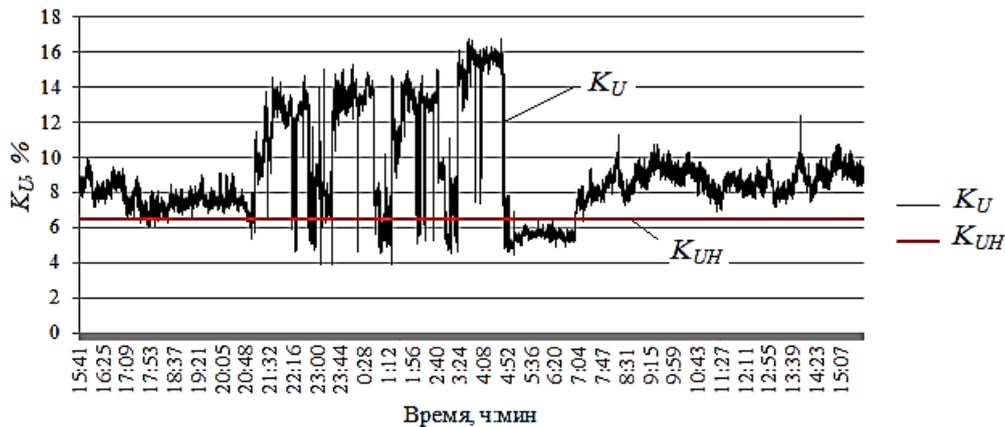


Рис. 6. Изменения суммарного коэффициента гармоник напряжения в фазе А
Fig. 6. Change of the total voltage harmonic distortion factor in the phase A

Таблица 2

Статистическая оценка $K_{U(n)}$ в фазе А для рабочего времени, %

Table 2

Statistical evaluation of $K_{U(n)}$ in the phase A for the working time, %

Значение	Гармоника											
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Max	2,5	6,2	11	1,9	3,0	2,1	1,8	3,3	1,6	1,5	2,9	1,9
Min	0,6	1,1	3,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
МО	1,5	3,4	7,1	1,0	0,6	0,7	0,8	1,4	0,5	0,6	0,9	0,6
Норма	≤ 3,0											
Значение	Гармоника											
	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49
Max	1,1	1,9	1,0	0,6	1,0	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
Min	0,02	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
МО	0,3	0,6	0,3	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Норма	≤ 3,0											

Таблица 3

Статистическая оценка $K_{U(n)}$ в фазе А для времени перерыва в работе, %

Table 3

Statistical evaluation of $K_{U(n)}$ in the phase A for the idle time, %

Значение	Гармоника											
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Max	2,1	12,7	12,8	1,6	4,6	1,9	0,8	1,5	1,5	2,1	3,1	1,8
Min	0,5	0,1	1,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
МО	1,2	5,4	6,9	0,8	1,8	0,5	0,3	0,7	0,4	0,3	0,8	0,4
Норма	≤ 3,0											
Значение	Гармоника											
	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49
Max	1,0	1,4	0,9	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1
Min	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Норма	≤ 3,0											

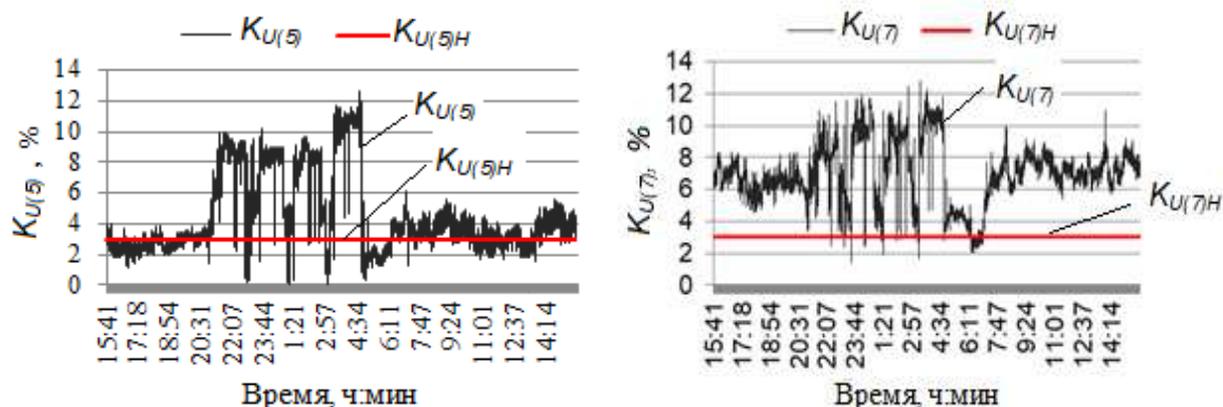


Рис. 7. Графики изменения $K_{U(5)}$ и $K_{U(7)}$ в фазе А
 Fig. 7. Graphs of $K_{U(5)}$ and $K_{U(7)}$ variation in the phase A

Результаты измерений гармоник токов. В табл. 4 и 5 приведены статистические оценки коэффициентов n -х гармонических составляющих тока $K_{I(n)}$ для некоторых гармоник, из данных таблиц следует, что величины $K_{I(n)}$ не превышают нормативное значение 12%, установленное в циркуляре № 25. Наибольшие значения коэффициент имеет на 3, 5, 7 гармониках, причем во время перерыва в работе.

Результаты измерений интергармоник напряжений и токов. Интергармоники, в отличие от гармоник, имеют дробные номера. Их частота не кратна частоте питающей сети 50 Гц. Интергармони-

ки появляются при работе таких нагрузок как статические преобразователи частоты. Они оказывают большое влияние на режим электрической сети, поскольку вызывают дополнительные потери электрической энергии [1]. В действующих нормативных документах по качеству электрической энергии в России и во Вьетнаме нет ни показателей, характеризующих интергармоники, ни норм на их величины.

При проведении измерений показателей качества электрической энергии и параметров несинусоидального режима были измерены значения напряжения и тока интергармонических центрированных

Таблица 4

Статистическая оценка $K_{I(n)}$ в фазе А для рабочего времени, %

Table 4

Statistical evaluation of $K_{I(n)}$ in the phase A for the idle time, %

Значение	Гармоника											
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Max	5,6	6,0	3,4	2,2	1,2	1,5	1,0	1,9	1,3	0,8	2,7	1,1
Min	1,6	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	3,3	3,6	1,4	1,0	0,3	0,6	0,4	0,7	0,3	0,2	0,5	0,3
Норма	≤ 12											
Значение	Гармоника											
	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49
Max	0,6	1,1	0,6	0,3	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0
Min	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Норма	≤ 12											



Таблица 5
Статистическая оценка $K_{I(n)}$ в фазе А для времени перерыва в работе, %

Table 5

Statistical evaluation of $K_{I(n)}$ in the phase A for the idle time, %

Значение	Гармоника											
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Max	7,1	6,8	6,7	2,9	3,9	1,9	1,2	2,3	1,9	2,3	2,5	2,4
Min	1,7	0,0	0,3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0
МО	4,0	2,0	2,8	1,6	1,3	0,7	0,5	1,0	0,5	0,4	1,0	0,5
Норма	≤ 12											
Значение	Гармоника											
	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49
Max	1,3	1,2	0,6	0,8	0,8	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0,2
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Норма	≤ 12											

подгрупп (ГОСТ 30804.4.7-2013⁴), частота интергармонической центрированной подгруппы определяется как среднее значение двух частот, кратных основной частоте, т.е.

$$f_{isg,n} = (f_n + f_{n+1})/2,$$

где n – номер гармоники, isg – интергармоническая центрированная подгруппа.

В табл. 6–9 приведены статистические оценки величин напряжения и тока для интергармонических центрированных подгрупп в фазе А как для рабочего времени, так и для времени перерыва в работе. Номер интергармоники, представленный, например, как «1-2», означает, что номер интергармоники центрированной подгруппы $i = (1 + 2)/2 = 1,5$.

Таблица 6
Статистическая оценка величин напряжения интергармонических центрированных подгрупп в фазе А для рабочего времени, %

Table 6

Statistical evaluation of the interharmonic centered subgroup voltages in the phase A for the working time, %

Значение	Интергармоника										
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
Max	3,9	1,1	1,7	1,8	1,0	1,3	1,3	0,9	1,2	1,5	2,3
Min	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
МО	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Значение	Интергармоника										
	23-24	25-26	27-28	29-30	31-32	33-34	35-36	37-38	39-40	41-42	43-44
Max	2,9	2,3	1,4	1,3	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
Min	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	0,1	0,1	0,1	0,0	0,03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

⁴ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2013.

Таблица 7

Статистическая оценка величин напряжения интергармонических
 центрированных подгрупп в фазе А для времени перерыва в работе, %

Table 7

Statistical evaluation of the interharmonic centered
 subgroup voltages in the phase A for the idle time, %

Значение	Интергармоника										
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
Max	1,6	1,0	1,6	1,8	1,0	1,3	0,9	0,8	1,1	0,9	2,2
Min	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Значение	Интергармоника										
	23-24	25-26	27-28	29-30	31-32	33-34	35-36	37-38	39-40	41-42	43-44
Max	2,8	2,2	1,3	1,3	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Таблица 8

Статистическая оценка величин тока интергармонических
 центрированных подгрупп в фазе А для рабочего времени, А

Table 8

Statistical evaluation of the interharmonic
 centered subgroup currents in the phase A for the working time, A

Значение	Интергармоника										
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
Max	16,6	6,0	4,6	4,0	3,9	5,1	5,1	4,5	7,5	8,5	6,6
Min	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
МО	3,7	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3
Значение	Интергармоника										
	23-24	25-26	27-28	29-30	31-32	33-34	35-36	37-38	39-40	41-42	43-44
Max	4,2	3,4	2,9	2,4	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	0,9	0,8
Min	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Из данных, приведенных в табл. 6–9 следует, что в рабочее время величины интергармоник напряжения и тока превышают величины интергармоник во время перерыва в работе. Из результатов измерений видно, что нагрузки угольного карьера являются источниками гармоник и интергармоник тока, которые вызывают появление гармоник и интергармоник напряжения. Коэффициенты $K_{U(5)}$ и $K_{U(7)}$ в рабочее время и во время перерыва в работе превышают нормативное значение 3%, установленное в циркуляре № 39.

Для снижения величин $K_{U(5)}$ и $K_{U(7)}$ до

нормативного значения необходимо применять специальные меры, например, установить активный фильтр.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Основные принципы работы активных фильтров были разработаны еще в 70-е годы прошлого века. Повышенное внимание они стали привлекать в последнее время в связи с появлением биполярных транзисторов с изолированным затвором и цифровых сигнальных процессоров [2, 3–22].



Таблица 9

**Статистическая оценка величин тока интергармонических
центрированных подгрупп в фазе А для времени перерыва в работе, А**

Table 9

**Statistical evaluation of the interharmonic
centered subgroup currents in the phase A for the idle time, A**

Значение	Интергармоника										
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22
Max	12,9	5,3	5,1	4,3	3,7	4,0	3,6	3,6	4,6	4,8	9,6
Min	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
МО	1,8	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6
Значение	Интергармоника										
	23-24	25-26	27-28	29-30	31-32	33-34	35-36	37-38	39-40	41-42	43-44
Max	13,1	12,5	7,0	7,5	5,4	4,7	3,3	2,4	2,8	1,8	1,3
Min	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
МО	0,7	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Принцип действия активного фильтра состоит в том, что силовая электроника фильтра генерирует в электрическую сеть гармоники токов равные по величине гармоникам токов, потребляемых нелинейной нагрузкой, но с противоположными фазами. Ток нагрузки измеряется трансформатором тока, затем анализируется цифровым сигнальным процессором для определения спектра гармоник тока, их величин и фаз. Полученная информация используется генератором гармоник тока для генерации в сеть в следующем периоде гармоник тока с величинами и фазами, необходимыми для компенсации гармоник тока и реактивной мощности, потребляемых нелинейной нагрузкой. В связи с тем, что активный фильтр управляется с помощью информации, получаемой от трансформатора тока, он динамически адаптируется к изменениям гармоник тока нагрузки. Процессы анализа и генерации гармоник токов контролируются программным обеспечением, поэтому активный фильтр легко программируется на компенсацию любых гармоник.

Активные фильтры классифицируются по величине генерируемой мощности [4]. Выбранный для компенсации гармоник токов фильтр должен соответствовать мощности нелинейной нагрузки и потребляемой ею реактивной мощности.

Активные фильтры малой мощности имеют номинальную мощность меньше 100 кВ·А. Они предназначены для использования в трехфазных сетях жилых районов, коммерческих зданий, больниц, малых и средних заводских нагрузок, предприятий, использующих электропривод. Активные фильтры малой мощности имеют скорость реакции на изменение гармоник тока нагрузки в интервале от десятков мкс до мс. В течение этого времени активные фильтры генерируют в сеть гармоники тока и реактивную мощность, которая соответствует потребностям электрической сети в месте установки фильтра [2, 5].

Активные фильтры средней мощности имеют номинальные мощности от 100 кВ·А до 10 МВ·А. Они предназначены для использования в трехфазных распределительных сетях среднего и высокого напряжения, в т.ч. при незначительной несимметрии напряжения. Из экономических соображений в распределительных сетях высокого напряжения активные фильтры для компенсации реактивной мощности не используются, поскольку возникают проблемы с изоляцией. Скорость реакции активного фильтра средней мощности на изменение гармоник тока нагрузки составляет десятки мс.

Активные фильтры большой мощно-

сти имеют номинальные мощности более 10 МВ·А. Они очень дорогостоящие, потому что в настоящее время отсутствует электронное оборудование, которое работает при высоком напряжении и на высоких частотах. Работа этих фильтров должна обеспечиваться специальными датчиками тока и измерительными трансформаторами, которые должны работать при высоких напряжениях и больших токах. Время реакции активного фильтра большой мощности составляет десятки секунд. Оно необходимо для работы контакторов и автоматических выключателей после принятия оптимального решения о переключении транзисторов.

По способу подключения к сети относительно нелинейной нагрузки различают последовательные и параллельные активные фильтры.

Параллельный активный фильтр используется как для компенсации гармоник тока, так и реактивной мощности нелинейной нагрузки [6–8, 13, 15]. На рис. 8 а приведена схема присоединения параллельного фильтра к сети, на рис. 8 б – схема последовательного фильтра. Электрическая сеть представлена источником напряжения, а нелинейная нагрузка – источником тока.

На рис. 8 а, б обозначено: \dot{U}_C – вектор напряжения сети; \dot{I}_C – вектор тока сети; Z_C – сопротивление сети; \dot{I}_ϕ – вектор тока фильтра; Y_H – проводимость нелинейной нагрузки; \dot{I}_H – вектор тока источника тока нелинейной нагрузки; U_{DC} – напряжение постоянного тока конденсатора фильтра; L_ϕ – индуктивность фильтра; C_ϕ – конденсатор фильтра.

Последовательные активные фильтры [9–11] используются, если необходимо компенсировать только гармоники тока. Они присоединяются между источником напряжения сети и нелинейной нагрузкой через трехфазные трансформаторы или три однофазных трансформатора, как показано на рис. 8 б. Главным недостатком последовательного фильтра является необходимость выдерживать большие по величине токи нагрузки, что увеличивает номинальный ток фильтра, по сравнению с параллельным, во вторичной обмотке соединительного трансформатора. Основное преимущество последовательных фильтров перед параллельными состоит в том, что они подходят для устранения гармоник напряжения и симметрирования трехфазных напряжений [12].

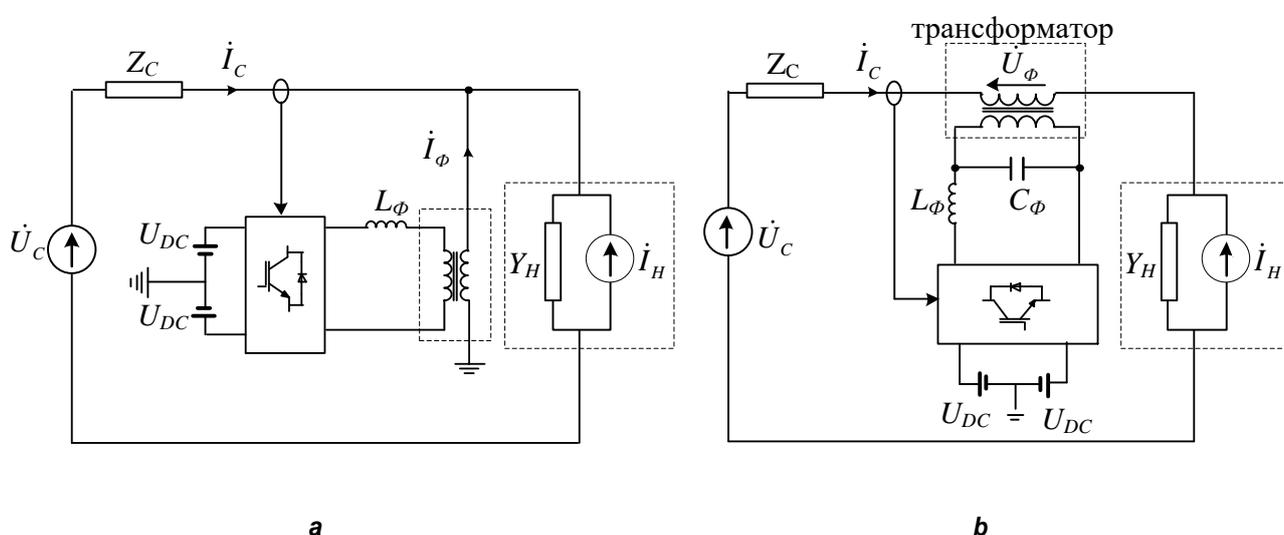


Рис. 8. Схемы присоединения к сети параллельного активного фильтра (а) и последовательного активного фильтра (б)

Fig. 8. Network connection diagrams of (a) a parallel active filter and (b) a serial active filter



5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа схемы электро-снабжения угольного карьера, состава электрооборудования сортировочного комбината, результатов измерений показателей качества электрической энергии и параметров несинусоидального режима, характеристик активных фильтров можно сделать вывод о возможности применения активного фильтра для снижения несину-

соидальности напряжения и тока до требований, установленных в нормативных документах по качеству электрической энергии, действующих во Вьетнаме. При выборе типа, мощности и параметров активного фильтра необходимо провести тщательный анализ результатов измерений параметров режима сети, в которой он будет устанавливаться, как на частотах гармоник и интергармоник, так и на основной частоте.

Библиографический список

1. Аничков С.П. Интергармоники в электрической сети предприятий черной металлургии // Актуальные вопросы современной техники и технологии: сб. докл. III Междунар. науч. заоч. конф. (г. Липецк, 29 января 2011 г.). Липецк: Изд. центр «Гравис», 2011. Ч. 2. С. 7–10.
2. Husen S., Pinkal J. Patel. A literature review and industrial survey on active power filter // International Journal of Engineering Research and Development. 2014. Vol. 2. No. 1. P. 118–125.
3. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1999. Vol. 46. No. 5. P. 960–971. <https://doi.org/10.1109/41.793345>
4. El-Habrouk M., Darwish M.K., Mehta P. Active power filter: A review // IEEE Proceedings in Electric Power Applications. 2000. Vol. 147. No. 5. P. 403. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20000522>
5. Fujita H., Akagi H. An approach to harmonic current-free AC/DC power conversion for large industrial loads: The integration of a series active filter with a double-series diode rectifier // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1997. Vol. 33. Issue 5. P. 1233–1240. <https://doi.org/10.1109/28.633801>
6. Samal S., Hota P.K., Barik P.K. Harmonics Mitigation by using Shunt Active Power Filter under Different Load Condition // International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (Paralakhemundi, 3–5 October 2016). Paralakhemundi: IEEE, 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/SCOPE5.2016.7955598>
7. Mohamed J.M.A. Rasul, Khang H.V., Kolhe M. Harmonic Mitigation of a Grid-connected Photovoltaic System using Shunt Active Filter // 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (Sydney, 11–14 August 2017). Sydney: IEEE, 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056401>
8. Mane M., Namboothiripad M.K. PWM based Sliding Mode Controller for Shunt Active Power Filter // International Conference on Nascent Technologies in Engineering (Navi Mumbai, 27–28 January 2017). Navi Mumbai: IEEE, 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNTE.2017.7947964>
9. Zhaoan Wang, Qun Wang, Weizheng Yao, Jinjun Liu. A Series Active Power Filter Adopting Hybrid Control Approach // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2001. Vol. 16. No. 3. P. 301–310. <https://doi.org/10.1109/63.923761>
10. Xing Zhang, Hong Zhu, Fei Li, Fang Liu, Chun Liu, Benxuan Li. An LCL-LC Power Filter for Grid-Tied Inverter // International Conference of IEEE Region 10 (Xi'an, 22–25 October 2013). Xi'an: IEEE, 2014. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2013.6718873>
11. Manitha P.V., Raji S., Manjula G. Nair. Performance Analysis of Different Control Algorithms for Series Active Filter // International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (Coimbatore, 5–7 March 2015). Coimbatore: IEEE, 2015. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2015.7225966>
12. Blajszczak G. Direct method for voltage distortion compensation in power networks by series converter filter // IEEE Proceedings in Electrical Power Applications. 1995. Vol. 142. No. 5. P. 308–312. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19952068>
13. Haroen Y., Riyadi S. Analysis of Instantaneous Representative Active Power Equality based Control Method for Three Phase Shunt Active Power Filter // International Conference on Power Electronics and Drives Systems (Kuala Lumpur, 28 November – 1 December 2005). Kuala Lumpur: IEEE, 2005. P. 542–547. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2005.1619746>
14. Huawei Yuan, Xinjian Jiang. A Simple Active Damping Method for Active Power Filters // Applied Power Electronics Conference and Exposition (Long Beach, 20–24 March 2016). Long Beach: IEEE, 2016. P. 907–912. <https://doi.org/10.1109/APEC.2016.7467979>
15. Abbas Taher S., Hosein Alae M., Dehghani Arani Z. Model Predictive Control of PV-Based Shunt Active Power Filter in Single Phase Low Voltage Grid Using Conservative Power Theory // 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (Mashhad, 14–16 February 2017). Mashhad: IEEE, 2017. P. 253–258. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2017.7910332>
16. Ullah A., Inam Ul Hasan Sheikh, Arshad S., Saleem F. Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System // 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (Islamabad, 8–12 January 2019). Islamabad: IEEE, 2019. P. 384–388. <https://doi.org/10.1109/IBCAST.2019.8667169>
17. Cleary-Balderas A., Medina-Rios Senior A., Cruz-Hernández O. Hybrid Active Power Filter Based on the

IRP Theory for Harmonic Current Mitigation // International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (Ixtapa, 9–11 November 2016). Ixtapa: IEEE, 2016. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2016.7830608>

18. Pereira R.R., da Silva C.H., Borges da Silva L.E., Lambert-Torres G. Application of adaptive filters in active power filters // Brazilian Power Electronics Conference (Bonito-Mato Grosso do Sul, 27 September – 1 October 2009). Bonito-Mato Grosso do Sul: IEEE, 2009. P. 770–774. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347654>

19. Hongyong Ge, Yuanwei Zhen, Yu Wang, Duo Wang. Research on LCL Filter Active Damping Strategy in Active Power Filter System // 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (Kunming, 10–12 July 2017). Kunming: IEEE, 2017. P. 476–481. <https://doi.org/10.1109/ICMIC.2017.8321691>

20. Tongun T., Abdul-Aziz A.R., El-Habrouk M. Online Harmonic Current Mitigation Using Switched Capacitor Active Power Filter // Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (Cairo, 19–21 December 2017). Cairo: IEEE, 2018. P. 650–655. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2017.8301250>

21. Panchbhai A., Prajapati N., Parmar S. Comparative Study of Reference Current Generation for Shunt Active Power Filter // International Conference on Power and Embedded Drive Control (Chennai, 16–18 March 2017). Chennai: IEEE, 2017. P. 381–386. <https://doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081119>

22. Gayatri M.T.L., Alivelu M. Parimi. Power Quality Improvement of PV-WECS Microgrid Using Active Power Filter in Realtime // 53rd International Universities Power Engineering Conference (Glasgow, 4–7 September 2018). Glasgow: IEEE, 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541905>

References

1. Anichkov SP. Interharmonics in Electric Networks of Ferrous Metallurgy Enterprises. In: *Aktual'nye voprosy sovremennoj tekhniki i tekhnologii: sbornik dokladov III Mezhdunarodnoj nauchnoj zaochnoj konferencii = Actual Problems of Modern Engineering and Technology: Collected Reports of III International scientific virtual conference*. 29 January 2011, Lipetsk. Lipetsk: Gravis; 2011, part 2, p. 7–10. (In Russ.)

2. Husen S, Pinkal J Patel. A Literature Review and Industrial Survey on Active Power Filter. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2014;2(1):118–125.

3. Singh B, Al-Haddad K, Chandra A. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1999;46(5):960–971. <https://doi.org/10.1109/41.793345>

4. El-Habrouk M, Darwish MK, Mehta P. Active Power Filter: A Review. *IEEE Proceedings in Electric Power Applications*. 2000;147(5):403. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20000522>

5. Fujita H, Akagi H. An Approach to Harmonic Current-Free AC/DC Power Conversion for Large Industrial Loads: The Integration of a Series Active Filter with a Double-Series Diode Rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1997;33(5):1233–1240. <https://doi.org/10.1109/28.633801>

6. Samal S, Hota PK, Barik PK. Harmonics Mitigation by using Shunt Active Power Filter under Different Load Condition. In: *International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*. 3–5 October 2016, Paralakhemundi. Paralakhemundi: IEEE; 2017, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/SCOPE.2016.7955598>

7. Mohamed JMA Rasul, Khang HV, Kolhe M. Harmonic Mitigation of a Grid-connected Photovoltaic System using Shunt Active Filter. In: *20th International Conference on Electrical Machines and Systems*. 11–14 August 2017, Sydney. Sydney: IEEE; 2017, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056401>

8. Mane M, Namboothiripad MK. PWM based Sliding Mode Controller for Shunt Active Power Filter. In: *International Conference on Nascent Technologies in Engi-*

neering. 27–28 January 2017, Navi Mumbai. Navi Mumbai: IEEE; 2017, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNTE.2017.7947964>

9. Zhaoan Wang, Qun Wang, Weizheng Yao, Jinjun Liu. A Series Active Power Filter Adopting Hybrid Control Approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2001;16(3):301–310. <https://doi.org/10.1109/63.923761>

10. Xing Zhang, Hong Zhu, Fei Li, Fang Liu, Chun Liu, Benxuan Li. An LCL-LC Power Filter for Grid-Tied Inverter. In: *International Conference of IEEE Region 10*. 22–25 October 2013, Xi'an. Xi'an: IEEE; 2014, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2013.6718873>

11. Manitha PV, Raji S, Manjula G Nair. Performance Analysis of Different Control Algorithms for Series Active Filter. In: *International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies*. 5–7 March 2015, Coimbatore. Coimbatore: IEEE; 2015, p. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2015.7225966>

12. Blajszczak G. Direct Method for Voltage Distortion Compensation in Power Networks by Series Converter Filter. *IEEE Proceedings in Electrical Power Applications*. 1995;142(5):308–312. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19952068>

13. Haroen Y, Riyadi S. Analysis of Instantaneous Representative Active Power Equality based Control Method for Three Phase Shunt Active Power Filter. In: *International Conference on Power Electronics and Drives Systems*. 28 November – 1 December 2005, Kuala Lumpur. Kuala Lumpur: IEEE; 2005, p. 542–547. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2005.1619746>

14. Huawei Yuan, Xinjian Jiang. A Simple Active Damping Method for Active Power Filters. In: *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 20–24 March 2016, Long Beach. Long Beach: IEEE; 2016, p. 907–912. <https://doi.org/10.1109/APEC.2016.7467979>

15. Abbas Taher S, Hosein Alaee M, Dehghani Arani Z. Model Predictive Control of PV-Based Shunt Active Power Filter in Single Phase Low Voltage Grid Using Conservative Power Theory. In: *8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference*. 14–16 February 2017, Mashhad. Mashhad: IEEE; 2017, p. 253–



258. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2017.7910332>
16. Ullah A, Inam UI Hasan Sheikh, Arshad S, Saleem F. Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System. In: *16th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology*. 8–12 January 2019, Islamabad. Islamabad: IEEE; <https://doi.org/10.1109/IBCAST.2019.8667169>
17. Cleary-Balderas A, Medina-Rios Senior A, Cruz-Hernández O. Hybrid Active Power Filter Based on the IRP Theory for Harmonic Current Mitigation. In: *International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing*. 9–11 November 2016, Ixtapa. Ixtapa: IEEE; 2016, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2016.7830608>
18. Pereira RR, da Silva CH, Borges da Silva LE, Lambert-Torres G. Application of Adaptive Filters in Active Power Filters. In: *Brazilian Power Electronics Conference*. 27 September – 1 October 2009, Bonito-Mato Grosso do Sul. Bonito-Mato Grosso do Sul: IEEE; 2009, p. 770–774. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347654>
19. Hongyong Ge, Yuanwei Zhen, Yu Wang, Duo Wang. Research on LCL Filter Active Damping Strategy

in Active Power Filter System. In: *9th International Conference on Modelling, Identification and Control*. 10–12 July 2017, Kunming. Kunming: IEEE; 2017, p. 476–481. <https://doi.org/10.1109/ICMIC.2017.8321691>
20. Tongun T, Abdul-Aziz AR, El-Habrouk M. Online Harmonic Current Mitigation Using Switched Capacitor Active Power Filter. In: *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference* (Cairo, 19–21 December 2017). Cairo: IEEE; 2018, p. 650–655. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2017.8301250>
21. Panchbhai A, Prajapati N, Parmar S. Comparative Study of Reference Current Generation for Shunt Active Power Filter. In: *International Conference on Power and Embedded Drive Control*. 16–18 March 2017, Chennai. Chennai: IEEE; 2017, p. 381–386. <https://doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081119>
22. Gayatri MTL, Alivelu M Parimi. Power Quality Improvement of PV-WECS Microgrid Using Active Power Filter in Realtime. In: *53rd International Universities Power Engineering Conference*. 4–7 September 2018, Glasgow. Glasgow: IEEE; 2018, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541905>

Критерии авторства

Буй Нгок Хунг, Коверникова Л.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bui Ngoc Hung, Kovernikova L.I. 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Буй Нгок Хунг,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: hungbui83eec@gmail.com

Bui Ngoc Hung,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: hungbui83eec@gmail.com

Коверникова Лидия Ивановна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
старший научный сотрудник Отдела
электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: kovernikova@isem.irk.ru

Lidia I. Kovernikova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Power Supply and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Senior Researcher of the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
✉ e-mail: kovernikova@isem.irk.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-333-344>

Математическая модель асинхронного генератора в задаче оценивания состояния электроэнергетической системы

© А.М. Глазунова, Е.С. Аксаева

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

Резюме: Цель – разработка рекомендаций по выбору математической модели асинхронного генератора в оценивании состояния электроэнергетической системы, т.к. на сегодняшний день распределительные сети недостаточно оснащены измерительными приборами, следствием чего является низкая избыточность измерений. Вместе с техническими мероприятиями по увеличению объемов информации необходимо развивать методы математической обработки данных, к которым принадлежат задачи достоверизации измерений и оценивания состояния. В работе рассматривается проблема выбора математической модели асинхронного генератора, которая получила широкое распространение на ветровых электростанциях в задаче оценивания состояния электроэнергетической системы. В данной работе применяются две математические модели асинхронного генератора: PQ- и RX-модели. Проведены исследования качества полученных оценок активной мощности асинхронного генератора в зависимости от используемой модели генератора, и выданы рекомендации по выбору модели. Выбранная математическая модель должна обеспечить возможность решения задачи достоверизации измерений и не стать причиной потери наблюдаемости узла. Рекомендации разработаны на основе анализа матрицы Якоби, структура которой определяется составом измерений. Расчеты выполнены на 30-узловой тестовой схеме IEEE при использовании смоделированных на базе заданных графиков нагрузки и генерации данных ветровой станции. По результатам исследований разработаны следующие рекомендации: если измерение активной мощности асинхронного генератора принадлежит к группе с низкой избыточностью, то следует использовать RX-модель для возможности решения задачи достоверизации измерений активной мощности асинхронного генератора и перетока активной мощности в линии, отходящей от этого узла; если измерение активной мощности является критическим, то следует использовать PQ-модель для обеспечения наблюдаемости данного узла.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, оценивание состояния, асинхронный генератор, математическая модель, анализ матрицы Якоби, задача достоверизации

Благодарности: Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310438-1.

Информация о статье: Дата поступления 10 октября 2019 г.; дата принятия к печати 02 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Глазунова А.М., Аксаева Е.С. Математическая модель асинхронного генератора в задаче оценивания состояния электроэнергетической системы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 333–344. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-333-344>

Mathematical model of an asynchronous generator for assessing the state of an electrical power system

Anna M. Glazunova, Elena S. Aksaeva

Melentiev Institute of Energy Systems, Irkutsk, Russia

Abstract: The study is aimed at determining criteria for a mathematical model of an asynchronous generator used to assess the state of an electrical power system. The relevance of the study is predicated on the current inadequacy of measuring instruments for electrical distribution networks, resulting in low measurement redundancy. Mathematical data processing methods, including tasks of measurement verification and state assessment, are developed to support technical measures for increasing the volume of information. The paper considers the problem of choosing a mathematical model for an asynchronous generator widely used in assessing the state of an electric power system at wind turbine power plants. In this paper, PQ and RX mathematical models of an asynchronous generator are used. Quality studies of the obtained active power of the asynchronous generator depending on the generator model are carried out and recommendations concerning the choice of model presented. The selected mathematical model should provide the opportunity

to solve the problem of measurement verification, causing no loss in the node observability. The recommendations are based on an analysis of the Jacobi matrix, with the structure determined by the measurement elements. The calculations were performed on an IEEE 30-node test circuit using simulated load schedules and generation of wind farm data. Based on the research results, the following recommendations were developed. In the case of asynchronous generator measurement where the active power belongs to a group with low redundancy, the RX model is appropriate for authenticating measurements of the asynchronous generator active power and its flow in the line leaving this node. In the case of critical active power measurement, the PQ model should be used to ensure the observability of this node.

Keywords: electric power system, state estimation, induction generator, mathematical model, Jacobi matrix analysis, reliability problem

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the scientific project III.17.4.2 of the Fundamental Research Program SB RAS, reg. no. AAAAA 17-117030310438-1.

Information about the article: Received October 10, 2019; accepted for publication March 02, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Glazunova AM, Aksaeva ES. Mathematical model of an asynchronous generator for assessing the state of an electrical power system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):333–344. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-333-344>

1. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электроэнергетическую систему (ЭЭС) меняет структуру энергетической отрасли и трансформирует принципы управления системой, а также усложняет соблюдение баланса мощности вследствие зависимости генерации, вырабатываемой на ветровых и солнечных станциях, от погодных условий. Для обеспечения всех потребителей бесперебойным электроснабжением ЭЭС должна обладать способностью реагировать на колебания и неопределенности, вызываемые нагрузкой и генерацией, поддерживать и восстанавливать стабильную и безопасную работу.

Отследить и спрогнозировать изменения в ЭЭС возможно при наличии точной информации о текущем состоянии системы. Информация о параметрах режима поступает в пункты управления ЭЭС с помощью системы SCADA (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition – система диспетчерского контроля и сбора данных реального времени) и WAMS (от англ. Wide Area Measurement System – система мониторинга переходных режимов). На сегодняшний день проблема наблюдаемости системообразующих сетей ЭЭС практически решена, чего нельзя сказать о распределительных сетях. В работе [1] дана количественная оценка наблюдаемости объек-

тов диспетчеризации системного оператора. Из общего количества подстанций, находящихся в ведомстве системного оператора, только 64% наблюдаются частично или полностью, 36% подстанций остаются ненаблюдаемыми. Наряду с техническими мероприятиями по увеличению объемов информации необходимо развивать методы математической обработки данных, к которым принадлежат задачи достоверизации измерений и оценивания состояния (ОС). Для получения наиболее приближенных к реальным значениям оценок параметров режима необходимы точные модели каждого элемента ЭЭС (генераторы, трансформаторы, линии электропередач, нагрузки).

В настоящее время в Европейских странах на более чем 85% имеющихся ветровых электростанциях установлены асинхронные генераторы с двойным питанием (асинхронизированный синхронный генератор), которые имеют перед синхронными генераторами ряд преимуществ: простота конструкции; надежность; высокий КПД [2].

В расчетах установившихся режимов [3] и в задачах оценивания состояния [4, 5] используются RX-модели асинхронного генератора. Работы [6–8] посвящены проблеме применения RX-модели при расчетах установившихся режимов (УР). Авторы [6] для расчета параметров установившегося режима организуют два итерационных процесса. Сначала вычисляются пара-



метры UP (первый итерационный процесс), затем определяется величина скольжения асинхронного генератора (второй итерационный процесс). В [7] предложена модель WTGS (Wind Turbine Generating Systems) на базе PQ-модели. В разработанной модели активная и реактивная мощности зависят от модуля напряжения, механической мощности и эквивалентной схемы.

В работах [9, 10] решается проблема применения RX-модели в задачах оценивания состояния. В работе [9] выполняется оценивание мощности выработки генератора DFIG (Doubly Fed Induction Generator – асинхронный генератор с двойным питанием) с помощью фильтра Калмана UKF (от англ. Unscented Kalman Filter – сигматочечный фильтр Калмана). При использовании фильтра Калмана получают достаточно точные результаты ОС ЭЭС, где установлены асинхронные генераторы, характеризующиеся высокой степенью нелинейности. Авторы [10, 11] применяют RX-модель асинхронного генератора в задаче ОС, которая решается за один итерационный процесс. При этом увеличивается размерность матрицы Якоби за счет введения скольжения в вектор состояния.

Авторы вышеупомянутых работ не акцентируют внимание на факте выбора модели асинхронного генератора, считают, что к задаче оценивания состояния следует подходить обдуманно, чтобы, с одной стороны, не потерять наблюдаемость узла, с другой – увеличить шанс обнаружения ошибочных измерений.

Целью исследования является разработка рекомендаций по выбору математической модели асинхронного генератора в задаче оценивания состояния электроэнергетической системы. В данной работе рассматриваются два варианта математического моделирования асинхронного генератора PQ- и RX-модели. PQ-модель традиционно используется в задачах оценивания состояния, RX-модель позволяет учитывать зависимость сопротивления от нагрузки.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общие сведения об асинхронном генераторе. Схема замещения. Асинхронные генераторы получили широкое распространение на ветровых электрических станциях. Использование генераторов данного типа позволяет решить проблему получения стабильных параметров электрической энергии от непредсказуемых источников энергии, одним из которых является ветер. Эффективным способом решения этой проблемы является преобразование механической энергии в электрическую с помощью асинхронизированного синхронного генератора [12], который является разновидностью машины двойного питания. Машина двойного питания конструктивно является асинхронной машиной с фазным ротором, имеющая отдельное питание обмоток статора и ротора [13].

Одной из основных характеристик асинхронных генераторов является скольжение. Оно изменяется в зависимости от режима работы, нагрузки на валу и питающего напряжения.

На рис. 1 показана T-образная схема замещения асинхронной машины.

На рис. 1 U_1 – подводимое к обмотке статора двигателя фазное напряжение; I_1 – ток обмотки статора; r_1 – активное сопротивление обмотки статора; x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; I_2' – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора; r_2' – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотки статора; x_2' – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотки статора; I_0 – ток холостого хода (намагничивания); x_m – индуктивное сопротивление контура (намагничивания).

$$\text{Активное сопротивление } r_2' = \frac{1-s}{s}$$

зависит от скольжения (при отсутствии

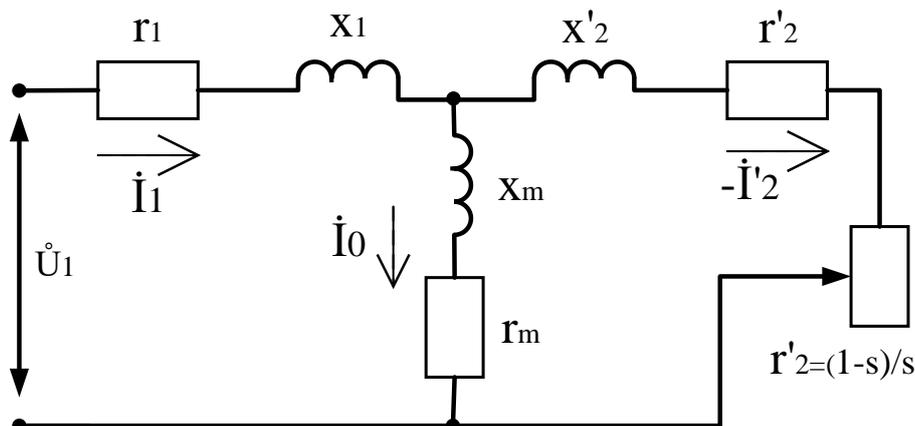


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронной машины
 Fig. 1. Equivalent T circuit of the induction motor

нагрузки на валу скольжение практически равно нулю: $s \approx 0$), следовательно сопротивление равно бесконечности; при перегрузке двигателя $s = 1$, а значит сопротивление равно нулю).

Математические модели асинхронного генератора. При решении задачи ОС в данной работе применяются две математические модели асинхронного генератора: PQ- и RX-модели.

При использовании PQ-модели значения активной и реактивной инъекций в узле i вычисляются как сумма перетоков в линиях, соединенных с данным узлом:

$$P_i = \sum_{j=1}^k P_{ij} + U_i^2 G_i; \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^k Q_{ij} + U_i^2 B_i, \quad (2)$$

где U_i – напряжение в узле i , P_{ij}, Q_{ij} – переток активной и реактивной мощностей в линии ij , G_i, B_i – активная и реактивная проводимости шунта в узле i ; k – количество соединенных с узлом i линий.

При использовании RX-модели значение инъекции активной мощности определяется через модуль напряжения и скольжение генератора по формуле [14]:

$$P_w = -\frac{sR_r U^2}{s^2(X_s + X_r) + R_r^2}, \quad (3)$$

где s – скольжение генератора; R_r, X_r – активное и реактивное сопротивление ротора, соответственно; X_s – реактивное сопротивление статора. Инъекция реактивной мощности рассчитывается по PQ-модели.

Измерительная информация и целевая функция. Оценивание состояния – это расчет установившегося режима по измеренным параметрам режима, которые записываются в виде вектора измерений [15, 16]:

$$\bar{y} = (U_i, \delta_i, P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}), \quad (4)$$

где U_i – модуль напряжения в узле i ; δ_i – фаза напряжения в узле i (если установлено устройство измерения векторных величин в этом узле); P_i, Q_i – активная и реактивная инъекции в узле i ; P_{ij}, Q_{ij} – активный и реактивный переток в линии $i-j$ (в трансформаторе).

Целевая функция ОС с PQ-моделью асинхронного генератора выглядит следующим образом:

$$J(U, \delta) = (\bar{y} - y(U, \delta))^T R_y^{-1} (\bar{y} - y(U, \delta)), \quad (5)$$



где R_y – ковариационная матрица ошибок измерений.

Чтобы вычислить вектор состояния, целевая функция (5) минимизируется, и решается система нелинейных уравнений:

$$H^T R^{-1} (\bar{y} - y(x)) = 0, \quad (6)$$

где H – матрица Якоби, $x = (U, \delta)$.

Целевая функция с RX-моделью асинхронного генератора выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} J(U, \delta, s) = & (\bar{y} - y(U, \delta))^T \times \\ & \times R_y^{-1} (\bar{y} - y(U, \delta)) + \\ & + (\bar{P}_w - P_w(U, s))^T R_w^{-1} (\bar{P}_w - P_w(U, s)), \end{aligned} \quad (7)$$

где P_w – активная мощность ветровой станции; R_w^{-1} – весовые коэффициенты измерений активной мощности ветровой станции.

Для вычисления вектора состояния производная функции (7) по x приравняется к нулю и решается система нелинейных уравнений:

$$H^T R^{-1} (\bar{y} - y(U, \delta)) = 0; \quad (8)$$

$$H_w^T R_w^{-1} (\bar{P}_w - P_w(U, s)) = 0. \quad (9)$$

Системы уравнений (6), (8), (9) решаются методом Ньютона. На каждой итерации уравнения линеаризуются, и поправки к компонентам вектора состояния вычисляются по следующей формуле:

$$\Delta x^{(i)} = P^i \left(H^{T(i)} R_y^{-1} (\bar{y} - y(x^i)) \right); \quad (10)$$

$$P^i = \left(H^{T(i)} R^{-1} H^i \right)^{-1}. \quad (11)$$

Для определения вектора состояния используется следующая формула:

$$x^{i+1} = x^i + \Delta x^i, \quad (12)$$

где $x = (U, \delta)$ в случае PQ-модели и $x = (U, \delta, s)$ в случае RX-модели.

Если $\Delta x^i < d_x$, то итерационный процесс сошелся, где d_x – точность итерационного процесса, и по полученному вектору состояния вычисляются все параметры режима.

Определение ошибки оценивания.

Ошибки оценивания вычисляются по формулам [17]:

$$\begin{aligned} err_{PQ} = & \\ = 1/N \sum_1^N & \left(abs(P_{true} - P(U, \delta)) / P_{true} \right) \times \\ & \times 100\%; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} err_{RX} = & \\ = 1/N \sum_1^N & \left(abs(P_{true} - P(U, s)) / P_{true} \right) \times \\ & 100\%, \end{aligned} \quad (14)$$

где err_{PQ} – ошибка оценивания при использовании PQ-модели, err_{RX} – ошибка оценивания при использовании RX-модели, P_{true} – эталон, N – количество срезов.

Рекомендации по выбору модели асинхронного генератора в задаче оценивания состояния. При выборе модели асинхронного генератора в задаче оценивания состояния рекомендуется исходить из того, что узел должен оставаться наблюдаемым, задача достоверизации измерений – обязательно решена.

Узел является наблюдаемым при наличии в матрице Якоби производных по углу и по модулю напряжения. Это условие выполняется, если компоненты вектора состояния измеряются или существует возможность их вычисления по измеренным параметрам режима.

При наличии измерений активной и реактивной мощностей на ветровой электростанции, а также при отсутствии измерений модуля и фазы напряжения в этом узле:

– в случае выбора PQ-модели в матрице Якоби имеются производные по

фазе и модулю напряжения, т.к. инъекция – это сумма перетоков мощности (1), (2), а перетоки являются функциями модуля и фазы напряжения. Следовательно, значения фазы и модуля напряжения могут быть вычислены (6), (10)–(12), и этот узел является наблюдаемым;

– в случае выбора RX-модели активная мощность является функцией от модуля напряжения и скольжения, следовательно, в матрице Якоби имеются производные по скольжению и модулю напряжения, и их значения вычисляются по формулам (8)–(12). Фаза напряжения может быть определена, только если измеряются перетоки активной мощности в линиях, отходящих от данного узла. Если измерение активной генерации критическое, то при использовании RX-модели этот узел становится ненаблюдаемым.

Решение задачи достоверизации требует избыточности измерений. Наиболее точным методом обнаружения грубых ошибок в измерениях является метод контрольных уравнений (КУ) [18]. Из измеренных параметров режима составляется контрольное уравнение (баланс мощности в узле или в линии) и анализируется его невязка. В случае отсутствия ошибок в измерениях, входящих в КУ, его невязка оказывается меньше некоторого порога. При низкой информационной избыточности метод КУ не работает. Под группой измерений с низкой избыточностью понимаются измерения, обеспечивающие наблюдаемость рассматриваемого узла, но их количество недостаточно для составления контрольного уравнения. В [19] разработан другой подход к решению задачи достоверизации измерений, относящихся к работе ветровой электростанции, где установлен асинхронный генератор.

Для наглядного представления правила выбора модели асинхронного генератора, установленного в узле W, рассматриваются 4 ситуации, отличающиеся друг от друга составом измерений и используемой моделью асинхронного генератора. В табл. 1–4 показаны матрицы Якоби для четырех ситуаций. По вертикали представлены из-

мерения, по горизонтали размещены компоненты вектора состояния. Знак «+» означает присутствие производной по рассматриваемой компоненте. Наличие производной по фазе и модулю напряжения говорит о том, что узел наблюдаемый. Наличие производных по фазе напряжения и по скольжению для одного и того же узла говорит о возможности выполнения достоверизации измерений, от которых берется производная.

Ситуации 1 (табл. 1), 2 (табл. 2). Состав измерений $\bar{P}_{1W}, \bar{Q}_W, \bar{P}_{W-i}$.

Таблица 1

PQ-модель

Table 1

PQ-model

Измерение	Вектор состояния		
	U_W	δ_W	s_W
\bar{P}_W	–	+	–
\bar{P}_{W-i}	–	+	–
\bar{Q}_W	+	–	–

Таблица 2

RX-модель

Table 2

RX-model

Измерение	Вектор состояния		
	U_W	δ_W	s_W
\bar{P}_W	–	–	+
\bar{P}_{W-i}	–	+	–
\bar{Q}_W	+	–	–

Анализ табл. 1 и 2 показывает:

1. Наблюдаемость обеспечивается как при выборе PQ-модели, так и при выборе RX-модели (есть производные по фазе и по модулю напряжения).

2. Для решения задачи достоверизации необходимо выбрать RX-модель.

Ситуации 3 (табл. 3), 4 (табл. 4). Состав измерений \bar{P}_{1W}, \bar{Q}_W .

Анализ табл. 3 и 4 показывает:

1. Для обеспечения наблюдаемости узла необходимо выбрать PQ-модель.

Таблица 3

PQ-модель

Table 3

PQ-model

Измерение	Вектор состояния		
	U_W	δ_W	s_W
\bar{P}_W	-	+	-
\bar{Q}_W	+	-	-

Таблица 4

RX-модель

Table 4

RX-model

Измерение	Вектор состояния		
	U_W	δ_W	s_W
\bar{P}_W	-	-	+
\bar{Q}_W	+	-	-

2. Решение задачи достоверизации невозможно в обоих случаях.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование скорости ветра и генерации на ветровой станции. Ве-

роятность скорости ветра оценивается по распределению Вейбула [20] при $a = 9,2$, $b = 5$, где a , b – постоянные. На рис. 2 показана типовая кривая ветровой турбины.

Из рис. 2 видно, что при достижении скорости ветра $V_{c.in} = 7$ м/с ветровая турбина начинает работать (c_{in} (cut_in) – минимальная рабочая скорость), при $V_r = 12$ м/с ветровая турбина достигает номинальной мощности (r – rated). До скорости ветра $V_{c.out} = 29$ м/с мощность турбины остается постоянной (c_{out} (cut_out) – максимальная рабочая скорость).

Мощность ветрового генератора вычисляется по формуле:

$$P_w = 1/2 \rho A v^3 c_p, \quad (15)$$

где ρ – плотность воздуха (1,605 кг/м³); v – скорости ветра (м/с); A – площадь ротора (1124 м²), c_p – коэффициент мощности.

На рис. 3 показана кривая мощности ветрового генератора.

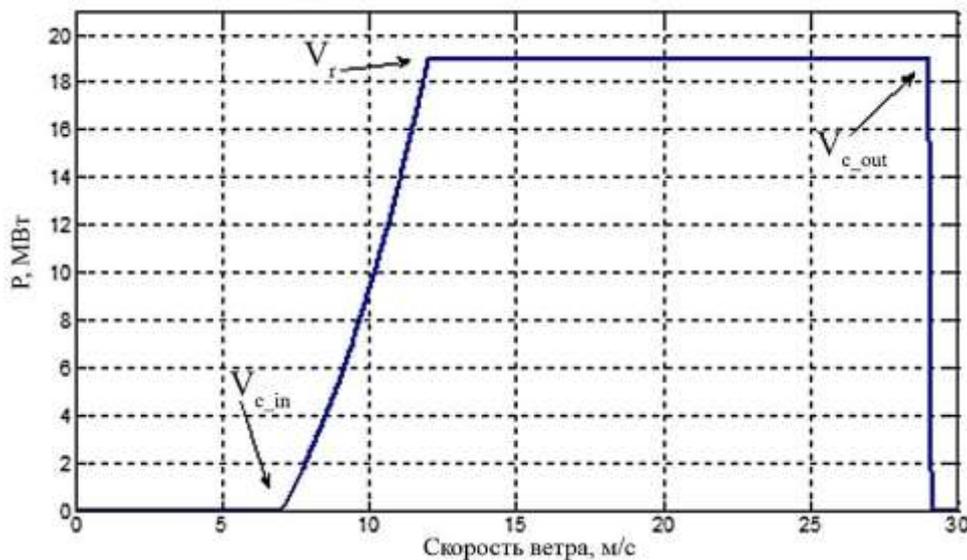


Рис. 2. Типовая кривая ветровой турбины (P – мощность, $V_{c.in}$ – минимальная рабочая скорость ветра, $V_{c.out}$ – максимальная рабочая скорость ветра, V_r – номинальная скорость ветра)

Fig. 2. A typical curve of a wind turbine (P – power, $V_{c.in}$ – minimum working wind speed, $V_{c.out}$ – maximum working wind speed, V_r – nominal wind speed)

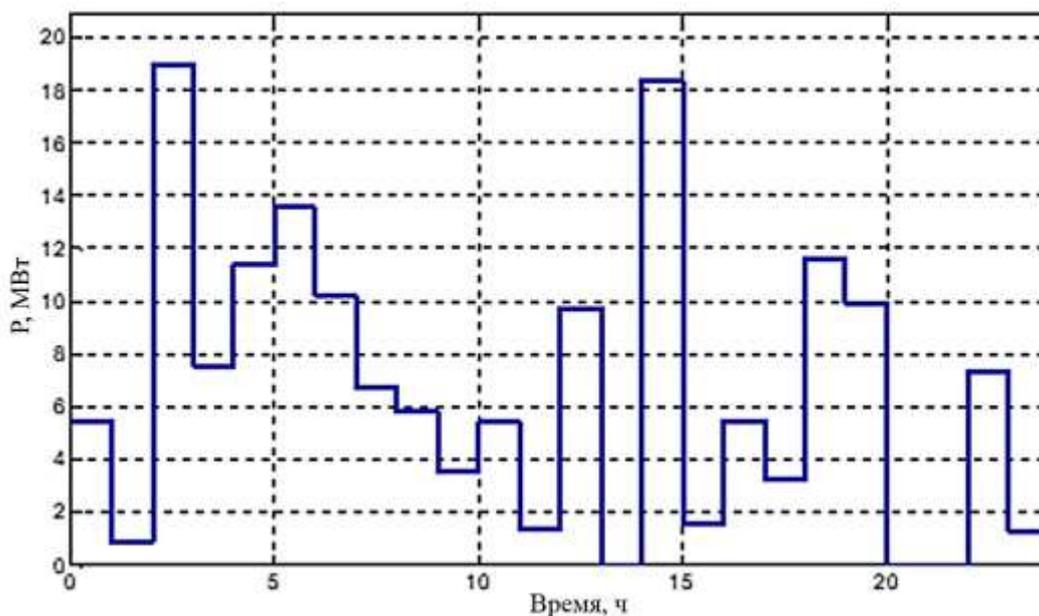


Рис. 3. Активная мощность ветрового генератора
 Fig. 3. Active power of the wind generator

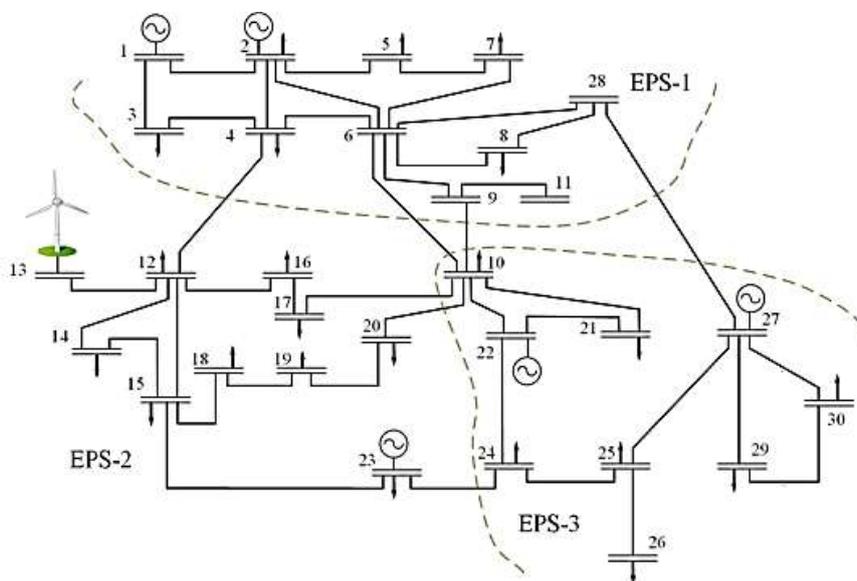


Рис. 4. 30-узловая тестовая схема IEEE
 Fig. 4. IEEE 30-bus test system

Моделирование срезов измерений. Срезы измерений моделируются в имитационном эксперименте на базе заданных графиков нагрузки и графика генерации на ветровой станции. Сначала вычисляется установившийся режим y_{true} , затем к значениям измеряемых параметров режима добавляется погрешность, сгенерированная датчиком случайных чисел x_{rand} :

$$\bar{y} = y_{true} + x_{rand}\sigma_y, \quad (16)$$

где σ_y – среднеквадратичное отклонение.

Расчетная схема. Расчеты выполнены на 30-узловой тестовой схеме IEEE, состоящей из трех ЭЭС (от англ. Electric Power System EPS1, EPS2, EPS3), (рис. 4) по сценариям, описанным в разделе 2 (см. табл. 1–4).



ОС выполняется по двум архивам с разными моделями асинхронного генератора. Ветровая электростанция обозначена узлом № 13. Балансирующим узлом является узел № 2. Точность измерений P_{13}, P_{12-13} одинаковая.

Для проведения исследований были смоделированы два архива. Архив 1 содержит 128 измерений, в т.ч. P_{13}, P_{12-13} . Архив 2 содержит 127 измерений (P_{12-13} отсутствует).

Описание расчетов. Выполняется оценивание состояния по архиву 1 для двух случаев:

Случай 1. Выбрана PQ-модель.

Фаза напряжения в узле 13 вычисляется из системы уравнений (6):

$$\frac{\partial P_{13}}{\partial \delta_{13}} \Delta \delta_{13} = \bar{P}_{13} - P_{13}(U_{13}, \delta_{13}). \quad (17)$$

Инъекция активной мощности вычисляется по формуле (1).

Случай 2. Выбрана RX-модель. Скольжение асинхронного генератора в узле 13 вычисляется из системы уравнений (9):

$$\frac{\partial P_{13}}{\partial s_{13}} \Delta s_{13} = \bar{P}_{13} - P_{13}(U_{13}, s_{13}). \quad (18)$$

Инъекция активной мощности рассчитывается по формуле (3), где значение U измеряется, $X_s = 0,2$; $X_r = 0,076$; $R_r = 0,007$.

Фаза напряжения в узле 13 определяется из системы уравнений (6):

$$\frac{\partial P_{13-12}}{\partial \delta_{13}} \Delta \delta_{13} = \bar{P}_{13-12} - P_{13-12}(U_{13}, \delta_{13}, U_{12}, \delta_{12}). \quad (19)$$

Выполняется оценивание состояния по архиву 2 для двух случаев:

Случай 1. Выбрана PQ-модель.

Фаза напряжения в узле 13 вычис-

ляется по формуле (17).

Случай 2. Выбрана RX-модель. Скольжение асинхронного генератора в узле 13 определяется из формулы (18). Вычисление фазы напряжения в узле 13 не представляется возможным, следовательно, узел 13 является ненаблюдаемым по активной мощности.

Ошибки оценивания, вычисленные по формулам (13), (14) для 137 рассматриваемых срезов измерений, равны $err_{PQ} = 0,013\%$, $err_{RX} = 0,01\%$. Из сравнения двух результатов можно сделать вывод, что точность оценок при разных моделях асинхронного генератора находится в пределах точности измерений.

Анализ полученных результатов.

В табл. 5, 6 показаны части матриц Якоби при выполнении оценивания состояния по двум архивам измерений при выборе разных моделей асинхронного генератора.

Таблица 5

Вид матрицы Якоби (архив 1)

Table 5

Jacobi matrix form (archive 1)

Измерение	Модель	U_{13}	δ_{13}	s_{13}
\bar{P}_{13}	PQ	-	+	-
\bar{P}_{13-12}		-	+	-
\bar{Q}_{13}		+	-	-
\bar{P}_{13}	RX	-	-	+
\bar{P}_{13-12}		-	+	-
\bar{Q}_{13}		+	-	-

Таблица 6

Вид матрицы Якоби (архив 2)

Table 6

Jacobi matrix form (archive 2)

Измерение	Модель	U_{13}	δ_{13}	s_{13}
\bar{P}_{13}	PQ	-	+	-
\bar{Q}_{13}		+	-	-
\bar{P}_{13}	RX	-	-	+
\bar{Q}_{13}		+	-	-

Для архива 1 рекомендуется выбирать RX-модель, т.к. появляется возмож-

ность решить задачу достоверизации измерений \bar{P}_{13} , \bar{P}_{13-12} . При этом узел 13 остается наблюдаемым. Для архива 2 рекомендуется выбирать PQ-модель, т.к. при выборе RX-модели узел 13 становится ненаблюдаемым.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты решения проблемы выбора между PQ- и RX-моделями асинхронных генераторов в задаче оценивания состояния. При использовании PQ-модели вычисляются фазовый угол и модуль напряжения в рассматриваемом узле. При использовании RX-модели определяются скольжение генератора и модуль напряжения.

В работе проведен сравнительный анализ оценок активной мощности асинхронного генератора, вычисленных по PQ-

и RX-моделям. Показано, что для рассматриваемого случая качество оценок активной мощности асинхронного генератора, полученных при использовании PQ- и RX-моделей, находится в пределах точности измерений.

По результатам исследований разработаны следующие рекомендации:

– если измерение активной мощности асинхронного генератора принадлежит к группе с низкой избыточностью, следует использовать RX-модель для возможности решения задачи достоверизации измерений активной мощности асинхронного генератора и перетока активной мощности в линии, отходящей от этого узла;

– если измерение активной мощности является критическим, следует использовать PQ-модель для обеспечения наблюдаемости данного узла.

Библиографический список

1. Приходько С.В. Обеспечение наблюдаемости параметров функционирования объектов диспетчеризации [Электронный ресурс]. URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_4_021_018_prez_01_nab.pdf (16.11.2019).
2. Котов А.А., Неустоев Н.И. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности // Вестник ЮрГУ. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 4. С. 80–89. <https://doi.org/10.14529/power170409>
3. Losi A., Russo M. Object oriented load flow for radial and weakly meshed distribution networks // IEEE Transactions on Power Systems. 2003. Vol. 18. No. 4. P. 1265–1274. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818600>
4. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. М.: Наука, 1976. 220 с.
5. Ning Zhou, Da Meng, Zhenyu Huang, Greg Welch. Dynamic State Estimation of a Synchronous Machine Using PMU Data: A Comparative Study // IEEE Transactions on Smart grid. 2015. Vol. 6. Issue 1. P. 450–460. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2345698>
6. Feijó A.E., Cidris J. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis // IEEE transactions on Power Systems. 2000. Vol. 15. No. 1. P. 110–115.
7. Srihari P., Rao G.S. Modeling and application of wind turbine generating system (WTGS) to distribution systems // International Journal of Computational Engineering Research. 2012. Vol. 2. Issue 5. P. 1521–1526.
8. Eminoglu U. Modeling and application of wind turbine generating system (WTGS) to distribution systems // Renewable Energy. 2009. Vol. 34. No. 11. P. 2474–2483. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.026>
9. Shenglong Yu, Kianoush Emami, Tyrone Fernando, Herbert Ho-Ching lu, Kit Po Wong. State Estimation of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine in Complex Power Systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 31. Issue 6. P. 4935–4944. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2507620>
10. Sun Guo-qiang, Wei Zhi-nong, Pang Bo. Impact of wind generators on power system state estimation // The International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (Nanjing, 6–7 April 2009). Nanjing: IEEE, 2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348145> (16.11.2019). <https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348145>
11. Miranda-Blanco B.N., Díaz-Dorado E., Carrillo C., Cidrás J. State estimation for wind farms including the wind turbine generator models // Renewable Energy. 2014. Vol. 71. P. 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.029>
12. Ключков С.Е., Завьялов В.М. Особенности применения асинхронизированного синхронного генератора // Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение: сб. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф. в рамках выставки (г. Екатеринбург, 26–28 мая 2015 г.). Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2015. С. 145–148.
13. Блоцкий Н.Н., Мамиконянц Л.Г., Шакарян Ю.Г. Исследование и применение асинхронизированных



машин в электроэнергетических системах // Электричество. 1985. № 12. С. 1–6.

14. Sun Guo-qiang, Wei Zhi-nong, Pang Bo. Impact of wind generators on power system state estimation // International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (Nanjing, 6–7 April 2009). Nanjing: IEEE, 2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348145> (16.11.2019).

<https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348145>

15. Yih-Fang Huang, Werner S., Jing Huang, Kashyap N., Gupta V. State estimation in electric power grids: Meeting new challenges presented by the requirements of the future grid // IEEE Signal Processing Magazine. 2012. Vol. 29. No. 5. P. 33–43. <https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2187037>

16. Колосок И.Н., Глазунова А.М., Коркина Е.С., Гурина Л.А., Аксаева Е.С. Использование СВИ для повышения точности расчета текущего режима ЭЭС методами оценивания состояния // Релейная защита и автоматика энергосистем – 2017: материалы

Международ. конф. и выставки (г. Санкт-Петербург, 25–28 апреля 2017 г.). Санкт-Петербург, 2017. С. 1181–1187.

17. Glazunova A. Model Selection for Wind-driven Asynchronous Machines in Electric Power System State Estimation Problems // The 10th international scientific symposium, Elektroenergetika (Stara Lesna, 16–18 September 2019). Stara Lesna, 2019. P. 411–414.

18. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах. Новосибирск: Наука, 2000. 149 с.

19. Глазунова А.М., Аксаева Е.С. Контроль качества измерительной информации электроэнергетической системы с ветровыми электростанциями // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 3. С. 24–29.

20. Weibull W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability // Journal of Applied Mechanics. 1951. Vol. 18. P. 293–297.

References

1. Prikhodko SV. Ensuring Observability of Scheduling Facility Operation Parameters. Available from: http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_4_021018_prez_01_nab.pdf [Accessed 16th November 2019]. (In Russ.)

2. Kotov AA, Neustroev NI. Use of Dual Power Generator for Wind Turbines of Small, Medium and Large Power. *Vestnik Yuzhno Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* = Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2017;17(4):80–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power170409>

3. Losi A, Russo M. Object Oriented Load Flow for Radial and Weakly Meshed Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2003;18(4):1265–1274. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818600>

4. Gamm AZ. *Statistical Methods for Assessing the State of Electric Power Systems*. Moscow: Nauka; 1976, 220 p. (In Russ.)

5. Ning Zhou, Da Meng, Zhenyu Huang, Greg Welch. Dynamic State Estimation of a Synchronous Machine Using PMU Data: A Comparative Study. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015;6(1):450–460. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2345698>

6. Feijdo AE, Cidris J. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis. *IEEE transactions on Power Systems*. 2000;15(1):110–115.

7. Srihari P, Rao GS. Modeling and Application of Wind Turbine Generating System (WTGS) to Distribution Systems. *International Journal of Computational Engineering Research*. 2012;2(5):1521–1526.

8. Eminoglu U. Modeling and Application of Wind Turbine Generating System (WTGS) to Distribution Systems. *Renewable Energy*. 2009;34(11):2474–2483. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.026>

9. Shenglong Yu, Kianoush Emami, Tyrone Fernando, Herbert Ho-Ching Lu, Kit Po Wong. State Estimation of

Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine in Complex Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016;31(6):4935–4944.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2507620>

10. Sun Guo-qiang, Wei Zhi-nong, Pang Bo. Impact of Wind Generators on Power System State Estimation. In: *The International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. 6–7 April 2009, Nanjing. Nanjing: IEEE; 2009. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348145> [Accessed 16th November 2019]. <https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348145>

11. Miranda-Blanco BN, Díaz-Dorado E, Carrillo C, Cidrás J. State Estimation for Wind Farms Including the Wind Turbine Generator Models. *Renewable Energy*. 2014;71:453–465.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.029>

12. Klochkov SE, Zav'yalov VM. Application Features of an Asynchronized Synchronous Generator. In: *Energosberezhenie. Otoplenie. Ventilyaciya. Vodosnabzhenie: sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii v ramkah vystavki* = Energy Saving. Heating. Ventilation. Water supply: Collected Reports of IV International scientific and practical conference within the framework of exhibition. 26–28 May 2015, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University Teacher Resource Center; 2015, p. 145–148. (In Russ.)

13. Blocky N.N., Mamikonyants L.G., Shakaryan Yu. G. Study and Use of Asynchronized Machines in Power Systems. *Elektrichestvo*. 1985;12:1–6. (In Russ.)

14. Sun Guo-qiang, Wei Zhi-nong, Pang Bo. Impact of Wind Generators on Power System State Estimation. In: *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. 6–7 April 2009, Nanjing. Nanjing: IEEE; 2009. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348145> [Ac-

cessed 16th November 2019].
<https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348145>

15. Yih-Fang Huang, Werner S, Jing Huang, Kashyap N, Gupta V. State Estimation in Electric Power Grids: Meeting New Challenges Presented by the Requirements of the Future Grid. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2012;29(5):33–43.
<https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2187037>

16. Kolosok IN, Glazunova AM, Korkina ES, Gurina LA, Aksaeva ES. Use of SVI to Improve Accuracy of EPS Current Mode Calculation Based on State Assessment Methods. In: *Reljejnaya zashchita i avtomatika energosistem – 2017: materialy Mezhdunarodnoj konferencii i vystavki = Relay Protection and Power System Automation - 2017: Proceedings of the International Conference and Exhibition*. 25–28 April 2017, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg; 2017, p. 1181–1187.

Критерии авторства

Глазунова А.М., Аксаева Е.С. 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Аксаева Елена Сергеевна,
кандидат технических наук,
младший научный сотрудник Отдела
электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: aksaeva@isem.irk.ru

(In Russ.)

17. Glazunova A. Model Selection for Wind-driven Asynchronous Machines in Electric Power System State Estimation Problems. In: *The 10th international scientific symposium, Elektroenergetika*. 16–18 September 2019, Stara Lesna. Stara Lesna; 2019, p. 411–414.

18. Gamm AZ, Kolosok IN. *Detection of telemetry gross errors in electric power systems*. Novosibirsk: Nauka; 2000, 149 p. (in Russ.)

19. Glazunova AM, Aksaeva ES. Control of Measurements Quality in Electric Power Systems with Wind Farms. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2019;3:24–29. (In Russ.)

20. Weibull W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*. 1951;18:293–297.

Authorship criteria

Glazunova A.M., Aksaeva E.S. 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.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Elena S. Aksaeva,
Cand. Sci. (Eng.),
Junior Researcher of the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Institute of Energy Systems,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: aksaeva@isem.irk.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.314

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-345-355>

Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей

© С.У. Довудов, М.П. Дунаев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью исследования представленной статьи является анализ энергетических показателей импульсных полупроводниковых преобразователей, в т.ч. такой важной характеристики их работы как коэффициент полезного действия. Для достижения данной цели применялись методы имитационного моделирования в среде Simulink программного комплекса MATLAB 7.5, в частности использовались блоки из библиотеки SimPowerSystem. Авторами разработаны модели полупроводниковых преобразователей с широтно-импульсной модуляцией с одним силовым ключом на транзисторе типа IGBT и полупроводникового преобразователя с частотно-импульсной модуляцией с четырьмя силовыми ключами на незапираемых тиристорах типа SCR. Корректность функционирования разработанных авторами моделей доказана с помощью экспериментальных исследований, проведенных на лабораторных макетах импульсных преобразователей, реализованных в лаборатории силовой электроники кафедры электропривода и электрического транспорта. В статье приведены результаты исследований разработанных моделей полупроводниковых преобразователей с широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией, сняты динамические и статические характеристики импульсных полупроводниковых преобразователей. Анализ полученных статических характеристик схем импульсных преобразователей показал, что жесткость выходных характеристик преобразователя с частотно-импульсной модуляцией выше, чем у преобразователя с широтно-импульсной модуляцией. Результаты расчетов коэффициента полезного действия импульсных полупроводниковых преобразователей, проведенные на основе анализа статических выходных характеристик, приводят к заключению, что коэффициент полезного действия полупроводникового преобразователя с частотно-импульсной модуляцией более чем на один процент выше коэффициента полезного действия полупроводникового преобразователя с широтно-импульсной модуляцией. Разработанные модели преобразователей с широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией могут применяться для исследования управления угловой скоростью электроприводов постоянного тока.

Ключевые слова: широтно-импульсный преобразователь, частотно-импульсный преобразователь, модель, характеристика, коэффициент полезного действия, полупроводниковый преобразователь

Информация о статье: Дата поступления 22 октября 2019 г.; дата принятия к печати 12 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Довудов С.У., Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 345–355. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-345-355>

Analysis of energy indicators of pulse converters

Sarfarozi U. Dovudov, Mikhail P. Dunaev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of this study was to analyse the energy indices of pulse semiconductor converters, including efficiency as an important characteristic of their operation. This aim was achieved through the use of the simulation modelling methods in the MATLAB 7.5 Simulink environment. In particular, blocks from the SimPowerSystem library were used. The authors developed the models of semiconductor converters with pulse-width modulation having a single power switch on the IGBT type transistor, coupled with a semiconductor converter with pulse-frequency modulation having four power switches on the permanently-open SCR type thyristors. The operation accuracy of the models was confirmed in a series of experimental studies carried out on the laboratory mock-ups of pulse converters implemented in the power electronics laboratory of the Department of Electric Drive and Electrical Transport. This article presents the developed models of semiconductor converters with pulse-width and pulse-frequency modulation. The dynamic and static characteristics of pulse semiconductor converters are determined. An analysis of the obtained static characteristics of pulse converter diagrams showed that the stiffness of output characteristics of the converter with pulse-frequency modulation is higher than that of a converter with pulse-width modulation. The calculation results of the efficiency of pulse semiconductor con-

verters conducted on the basis of the analysis of static output characteristics presume that the efficiency of the semiconductor converter with pulse-frequency modulation is more than one percent higher than the efficiency of a semiconductor converter with pulse-width modulation. The developed models of converters with pulse-width and pulse-frequency modulation can be used for studies of DC electric drive angular velocity controls.

Keywords: pulse-width converter, pulse-frequency converter, model, characteristic, efficiency, semiconductor converter

Information about the article: Received October 22, 2019; accepted for publication March 12, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Dovudov SU, Dunaev MP. Analysis of energy indicators of pulse converters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):345–355. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-345-355>

1. ВВЕДЕНИЕ

Существует значительное количество способов управления электродвигателями [1–3], но лучшим из них считается способ управления с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [4–6]. Этот способ позволяет сформировать требуемые форму, частоту и амплитуду напряжения питания двигателя, добиться высокой плавности и диапазона регулирования угловой скорости при изменении нагрузки в широких пределах [7–9].

К сожалению, у способа управления с ШИМ имеется и ряд недостатков: некоторое снижение КПД, высокая стоимость силовых ключей (транзисторов), повышенные электромагнитные помехи [10, 11].

Однако существует еще один способ импульсного управления, а именно – управление посредством частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). Данный способ может быть реализован с применением частотно-импульсного преобразователя постоянного тока (ЧИП), который в

перспективе имеет преимущества над методом ШИМ: повышенный коэффициент полезного действия (КПД), низкую стоимость силовых ключей (тиристоров), пониженные электромагнитные помехи [12, 13].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

ШИМ представляет собой главный блок системы управления широтно-импульсного преобразователя (ШИП). Широтно-импульсный преобразователь, преобразующий постоянное напряжение [1] в импульсное, среднее значение которого (т.е. его постоянную составляющую, выделяемую в нагрузку фильтрами) можно регулировать. Принцип регулирования выходного напряжения ШИП основан на периодическом замыкании и размыкании вентиляционных ключей – транзисторов или тиристоров. На рис. 1 приведена простейшая базовая схема ШИП [14] (рис. 1 а) и диаграмма напряжения на нагрузке (рис. 1 б).

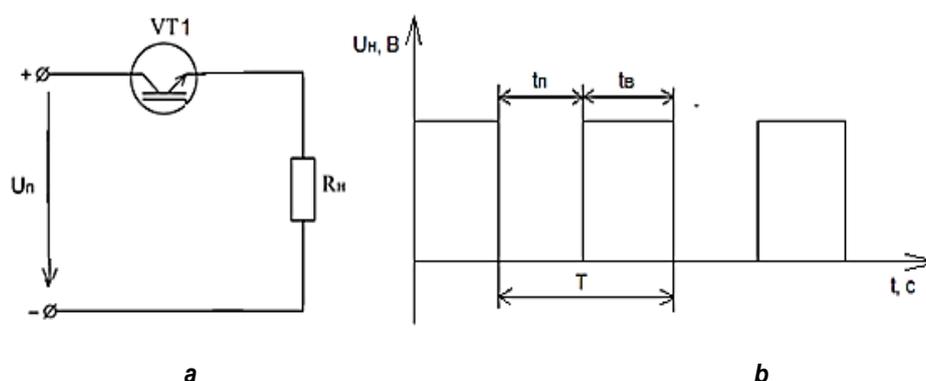


Рис. 1. Схема широтно-импульсного преобразователя (а) и диаграмма напряжения на нагрузке (б)

Fig. 1. Pulse width converter diagram (a) and the load voltage diagram (b)



Схема состоит из транзистора VT1 (IGBT-транзистор), который работает в режиме ключа, источника питания (U_n) и нагрузки (R_n). Такая схема обеспечивает только однополярную модуляцию. При включении транзистора VT1 (в режиме ключа) на нагрузке формируется положительный импульс напряжения. При выключении транзистора VT1 формируется пауза напряжения на нагрузке.

Важнейшим параметром, который характеризует работу ШИМ, является скважность γ , которую можно вычислить по формуле (1):

$$\gamma = \frac{t_B}{T} = \frac{t_B}{t_B + t_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где t_B – продолжительность положительного или отрицательного импульса напряжения, приложенного к нагрузке; $t_{\text{п}}$ – продолжительность паузы; T – период работы ШИМ.

График зависимости U_n от скважности γ называется регулировочной характеристикой ШИП [1], которую можно рассчитать по формуле (2):

$$U_n = U_{\text{п}} \cdot \gamma. \quad (2)$$

Изменяя γ , можно регулировать среднее значение напряжение на нагрузке. Максимальное напряжение на нагрузке получается при значении скважности $\gamma = 1$.

В среде MATLAB 7.5 с использованием блоков из библиотеки Simulink/SimPowerSystem¹ [15–18] смоделирована схема ШИП (см. рис. 1 а) с одним транзистором. Способ моделирования и адекватность работы модели ШИП доказана с помощью экспериментального исследования, которое описано подробно в [14].

Модель ШИП, которая показана на рис. 2, содержит: блок регулирования напряжения управления (U_y), которое можно регулировать от 0 до 10 В; блок системы управления ШИМ и блок силовой схемы ШИМ, состоящий из IGBT-транзистора, ак-

тивной нагрузки R_n и силового (питающего) звена, представленного в виде батареи с напряжением 100 В.

Разработанная модель ШИП уникальна в том смысле, что одновременно кроме тока и напряжения нагрузки показывает и КПД преобразователя. Это позволяет исследователю тратить меньше времени для расчета энергетических характеристик схемы ШИМ.

На рис. 3 показаны динамические характеристики ШИП при скважности $\gamma = 0,6$.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Принцип регулирования выходного напряжения ЧИП [10, 19] заключается в изменении выходной частоты ЧИП при постоянной длительности (ширине) импульса выходного напряжения t_u , т.е. фактически изменяется длительность паузы t_p (рис. 4 б).

Примером силовой схемы ЧИП может служить схема, показанная на рис. 4 а. Фактически это схема однофазного инвертора, нагрузка R_n которого включена на стороне постоянного (пульсирующего) тока.

Схема состоит из следующих элементов: VS1-VS4 – силовые тиристоры, соединенные по мостовой схеме; C – коммутирующий конденсатор; L – коммутирующий дроссель; R_n – активная нагрузка.

Схема работает следующим образом. Поочередно импульсами управления открываются пары тиристоров VS1-VS4 и VS2-VS3. Происходит перезаряд коммутирующего конденсатора по колебательному закону в контурах, содержащих коммутирующий дроссель, активную нагрузку и какую-либо из пар тиристоров (VS1-VS4 либо VS2-VS3).

Основной режим работы схемы (см. рис. 4 а) – это режим прерывистого тока в нагрузке. В этом случае имеет место естественная коммутация тиристоров, т.е. тири-

¹Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7: Самоучитель. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с.

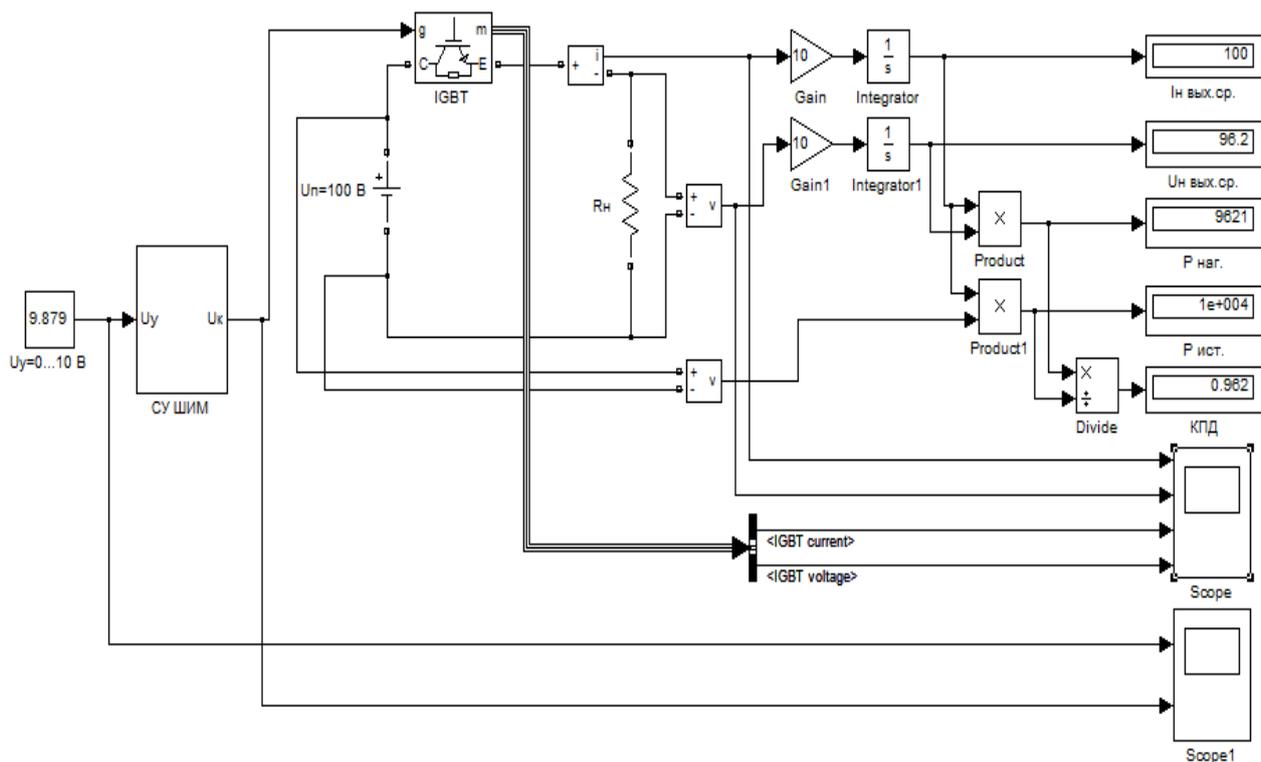


Рис. 2. Модель широтно-импульсного преобразователя
 Fig. 2. Model of a pulse width converter

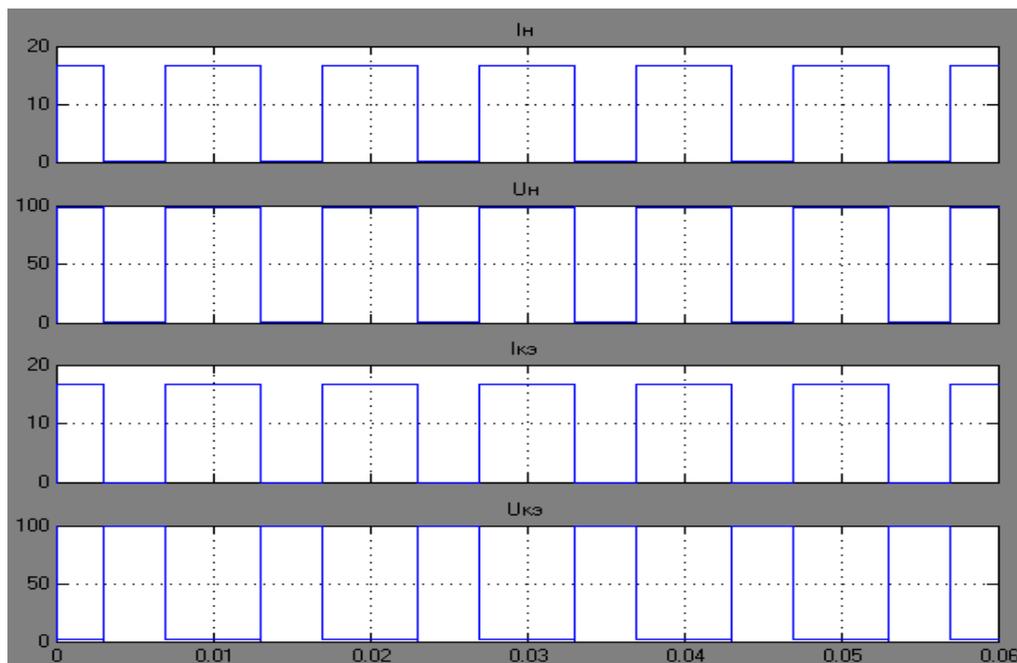


Рис. 3. Динамические характеристики работы широтно-импульсного преобразователя при скважности $\gamma = 0,6$: первый график – ток на нагрузке (I_n); второй график – напряжение на нагрузке (U_n); третий график – ток ($I_{кэ}$) транзистора VT1; четвертый график – напряжение ($U_{кэ}$) транзистора VT1

Fig. 3. Dynamic characteristics of pulse-width converter operation with the duty cycle of $\gamma = 0.6$: the first graph shows the load current (I_n); the second graph shows the load voltage (U_n); the third graph shows VT1 transistor current ($I_{кэ}$); the fourth graph shows VT1 transistor voltage ($U_{кэ}$)

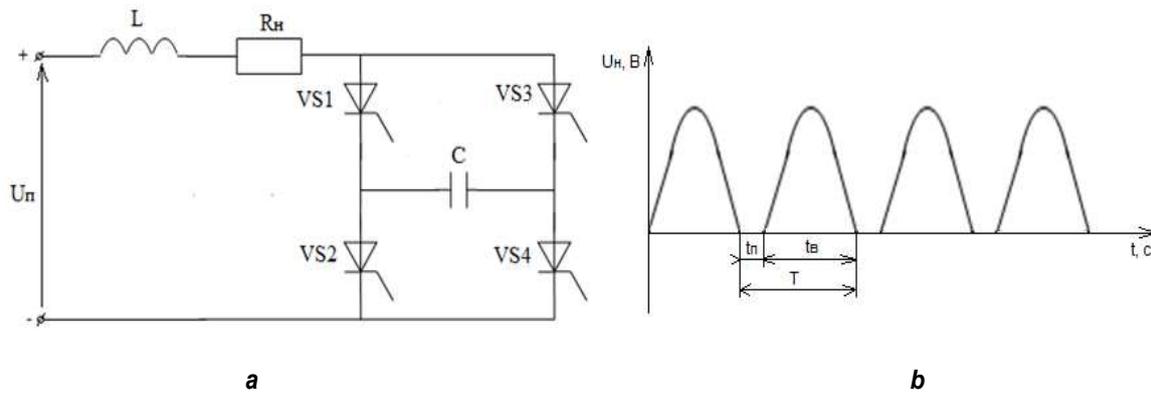


Рис. 4. Схема частотно-импульсного преобразователя (а) и диаграмма напряжения на нагрузке (б)
Fig. 4. Pulse frequency converter diagram (a) and load voltage diagram (b)

сторы работающей пары закрываются, когда зарядится конденсатор C и ток уменьшится до нуля. Отметим, что такой способ коммутации весьма надежен.

Аналогично график зависимости U_n от частоты следования выходных импульсов f называется регулировочной характеристикой ЧИП, который можно вычислять по формуле 3:

$$U_n = U_{\text{макс}} \cdot f_{\text{отн.}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{макс}}$ – максимальное выходное напряжение силовой схемы ЧИП. Максимальное напряжение U_n получается при максимальном значении относительной выходной относительной частоты $f_{\text{отн.}} = f / f_{\text{макс.}}$. Изменяя f , можно регулировать среднее значение напряжения в нагрузке.

Разработанная модель схемы ЧИП с четырьмя тиристорными ключами (рис. 4 а) в среде MATLAB 7.5 с использованием блоков из библиотеки Simulink/SimPowerSystem показана на рис. 5. Способ моделирования и адекватность работы модели ЧИП доказана с помощью экспериментального исследования, которое описано подробно в [20].

Модель ШИП, которая показана на рис. 5, содержит следующие блоки:

- задающий генератор (ЗГ) импульсов;
- распределитель импульсов (РИ) по каналам управления;
- силовая схема ЧИП, которая со-

стоит из VS1-VS4, R_n , L , C и источника питания с напряжением 100 В.

Напряжение U_{pu1} поступает на управляющие электроды тиристоров VS1 и VS4 и включает их. Через индуктивность L , нагрузку R_n , пару тиристоров VS1-VS4 и конденсатор C протекает ток. При этом конденсатор C заряжается. При подаче напряжения U_{pu2} на управляющие электроды тиристоров VS3 и VS2 данная пара тиристоров включается. Конденсатор C запирает пару тиристоров VS1-VS4 и ток будет протекать через индуктивность L , нагрузку R_n . Конденсатор C опять начинает заряжаться. Таким образом, отпирание тиристоров происходит при подаче импульсов, поступающих из блока РИ. Запирание тиристоров происходит за счет перезаряда конденсатора C .

Разработанная модель ЧИП, как и модель ШИП, одновременно рассчитывает и показывает ток нагрузки, напряжение на нагрузке и КПД преобразователя. На рис. 6 приведены динамические характеристики работы ЧИП при частоте $f = 145$ Гц ($\gamma = 0,6$), полученные в результате моделирования.

Как видно из диаграммы рис. 6, при низких частотах между импульсами идет пауза, а при частоте соответствующего номинального режима работы преобразователя импульсы налагаются друг на друга, из-за чего статическая регулировочная характеристика ЧИП получается нелинейной [20].

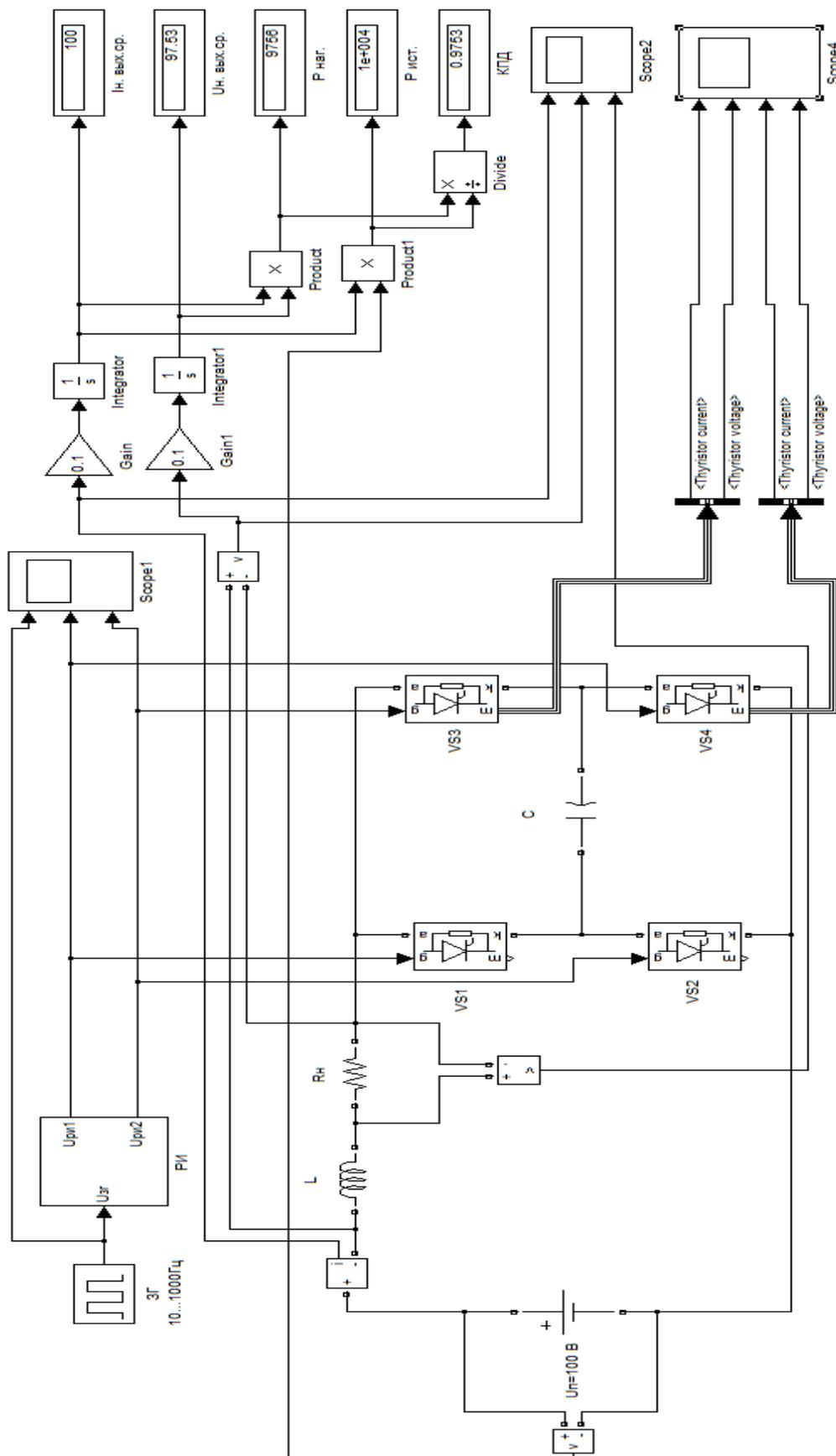


Рис. 5. Модель частотно-импульсного преобразователя
 Fig. 5. Model of a frequency-pulse converter

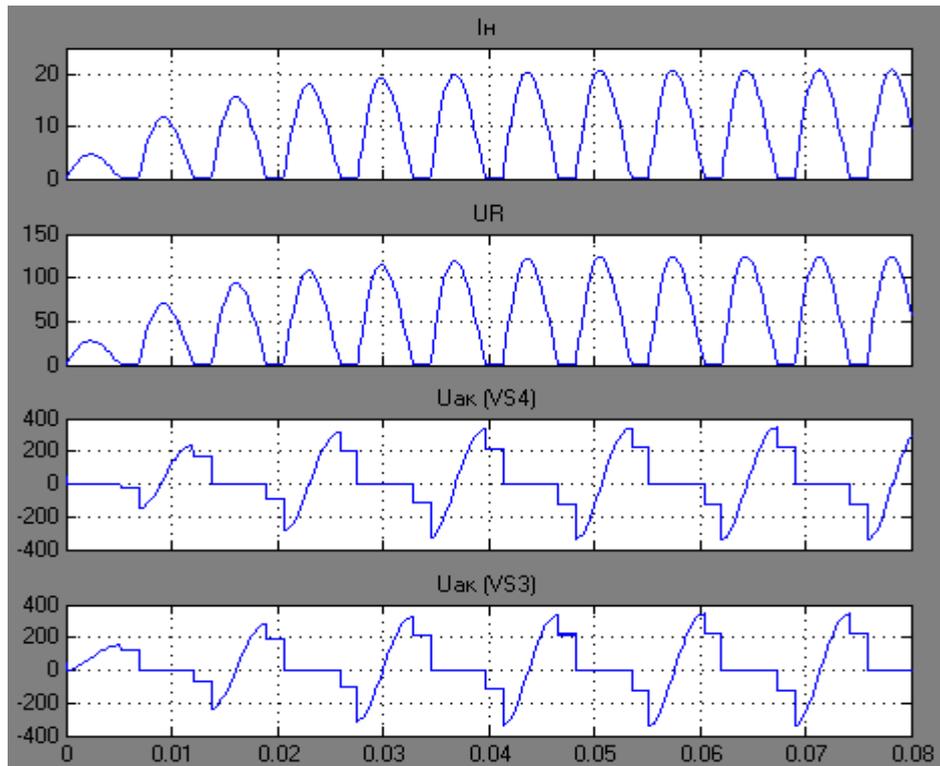


Рис. 6. Динамические характеристики работы частотно-импульсного преобразователя при частоте $f = 145$ Гц ($\gamma = 0,6$): первый график – ток на нагрузке (I_n); второй график – напряжение на активное нагрузку (U_R); третий график – напряжение ($U_{ак}$) тиристора VS4; четвертый график – напряжение ($U_{ак}$) тиристора VS3

Fig. 6. Dynamic characteristics of pulse-frequency converter operation at the frequency of $f = 145$ Hz ($\gamma = 0.6$): the first graph shows the load current (I_n); the second graph shows the active load voltage (U_R); the third graph shows VS4 thyristor voltage ($U_{ак}$); the fourth graph shows VS3 thyristor voltage ($U_{ак}$)

4. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО И ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

На разработанных моделях ШИП и ЧИП проведены исследования для сравнения энергетических показателей ШИП и ЧИП. Результаты исследований показаны на рис. 7 и 8.

На рис. 7 представлены выходные характеристики ШИП и ЧИП при номинальных режимах работы. Как видно, выходная характеристика ЧИП обладает большей жесткостью, чем выходная характеристика ШИП. Это связано с тем, что транзистор обладает большим внутренним сопротивлением, чем тиристор. На рис. 8 представлены характеристики КПД импульсных преобразователей при номинальных режимах работы.

Очевидно, что КПД ЧИП превышает КПД ШИП на 1,33 %. Это является следствием того, что выходная характеристика ЧИП обладает большей жесткостью, чем выходная характеристика ШИП.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследованы модели полупроводниковых преобразователей с широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией. Для разработки использовались методы имитационного моделирования в среде Simulink/SimPowerSystem комплекса MATLAB 7.5.

Приведены результаты исследования на разработанных моделях в виде динамических и статических характеристик преобразователей. Анализ полученных характеристик показал, что применение способа управления с ЧИМ повышает жест-

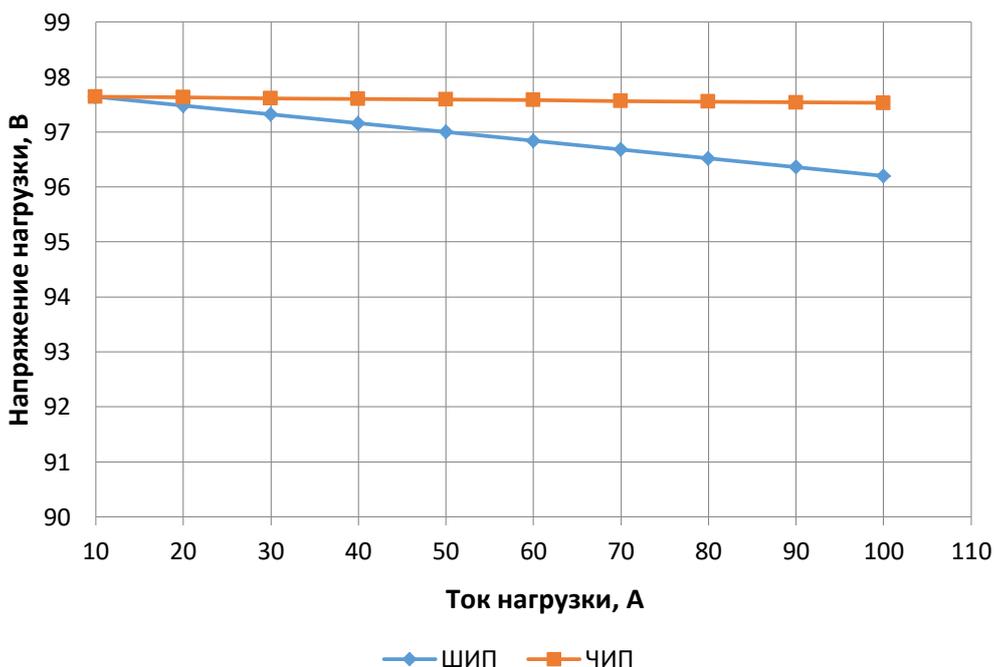


Рис. 7. Выходные характеристики импульсных преобразователей при номинальных режимах работы
Fig. 7. Pulse converter output characteristics at rated operating modes

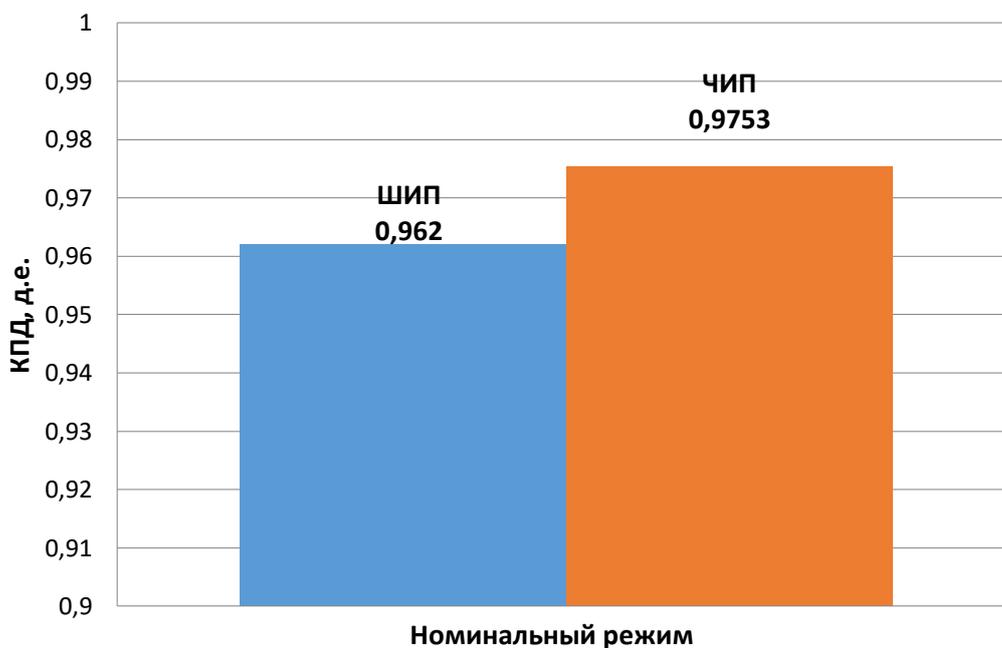


Рис. 8. Коэффициент полезного действия импульсных преобразователей при номинальных режимах работы
Fig. 8. Pulse converter efficiency at rated operating modes

кость выходных характеристик и КПД полупроводниковых преобразователей по сравнению со способом управления с ШИМ.

Разработанные модели могут применяться для исследования управления электроприводов постоянного тока.



Библиографический список

1. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. Л.: Энергия, 1973. 304 с.
2. Ревенко П.О., Полднева О.И., Коновалов Ю.В. Возможности частотно-регулируемых электроприводов при оптимизации энергопотребления // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 24–28 апреля 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. Т. 1. С. 50–53.
3. Арсентьев М.О., Климович В.Ю. Моделирование электропривода скребкового конвейера // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 24–28 апреля 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. Т. 1. С. 135–139.
4. Dewangan A.K., Chakraborty N., Shukla S., Yadu V. PWM Based Automatic Closed Loop Speed Control of DC Motor // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2012. Vol. 3. Issue 2. P. 1–3. [Электронный ресурс]. URL: <https://studylib.net/doc/12914711/pwm-based-automatic-closed-loop-speed-control-of-dc-motor> (23.02.2019).
5. Герман-Галкин С.Г. Широтно-импульсные преобразователи. Л.: Энергия, 1979. 96 с.
6. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem // Electrical, Control and Communication Engineering. 2013. Vol. 2. Issue 1. P. 20–26. <https://doi.org/10.2478/ecce-2013-0003>
7. Namboodiri A., Wani H.S. Unipolar and Bipolar PWM Inverter // International Journal for Innovative Research in Science & Technology. 2014. Vol. 1. Issue 7. P. 237–243. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Unipolar-and-Bipolar-PWM-Inverter-Namboodiri-Wani/5e5bfeb21a0c42e3ce26519218df918052ebec88> (23.02.2019).
8. Joshi N.P., Thakare A.P. Speed Control Of DC Motor Using Analog PWM // Technique International Journal of Engineering & technology. 2012. Vol. 1. Issue 9. P. 1–5. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ijert.org/research/speed-control-of-dc-motor-using-analog-pwm-technique-IJERTV1IS9465.pdf> (23.02.2019).
9. Arsentiev O.V., Arsentiev G.O., Dunaev M.P. Research of energy characteristics of frequency-regulated electric drive // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2017. Vol. 327. P. 1–8. [Электронный ресурс]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052005>
10. Дунаев М.П. Резонансные инверторы для управления электроприводами: научное издание. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 103 с.
11. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
12. Булатов О.Г., Царенко А.И. Тиристорно-конденсаторные преобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1982. 217 с.
13. Pulyakov A.V., Dunaev M.P., Arsentiev G.O. Universal control method of auxiliary electric motors // Aviamechanical engineering and transport. Series: Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference (Irkutsk, 21–26 May 2018). Irkutsk, 2018. Vol. 158. P. 109–113. <https://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.21>
14. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 22–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. Т. 1. С. 3–6.
15. Федорова З.А., Федорова С.Н. Анализ использования блоков дифференцирования при моделировании в среде MATLAB // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 22–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. Т. 1. С. 88–93.
16. Sathishkumar S., Nagarajan R., Yuvaraj R., Sridhar M., Elangovan M. Implementation of Pwm Technique For Integrated High Gain Boost Resonant Converter // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2018. Vol. 8. Issue 3. P. 59–66.
17. Singh B., Bhatt R., Sharma A., Pandit S., Channi H. Modeling and Designing of Matlab Based Speed Control of DC Motor Using PWM Technique // International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2017. Vol. 3. Issue 7. P. 681–686. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.14399.82082>
18. Кажура О.А., Рудич О.А., Сартаков В.Д. Анализ методики моделирования переходных процессов в электрических цепях с одним накопителем энергии с использованием ядра MATLAB // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 22–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. Т. 1. С. 26–31.
19. Илющенко В.В., Майтаев М.З. Методика расчета резонансных инверторов для электромотоцикла // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 22–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. Т. 1. С. 38–42.
20. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении: сб. тез. XXIV Байкальской Всерос. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 29 июня – 8 июля 2019 г.). Иркутск, 2019. С. 28.

References

1. Glazenko TA. *Semiconductor Converters in Direct Current Electric Drives*. Leningrad: Energia; 1973, 304 p. (In Russ.)
2. Revenko PO, Poldneva OI, Konovaly YV. Potential of Frequency-Regulated Electric Drive under Energy Consumption Optimization. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri: Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 24–28 April 2018, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018, vol. 1, p. 50–53. (In Russ.)
3. Arsentiev OV, Klimovich VY. Simulation of Flight Conveyor Electric Drive. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri: Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 24–28 April 2018, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018, vol. 1, p. 135–139. (In Russ.)
4. Dewangan AK, Chakraborty N, Shukla S, Yadu V. PWM Based Automatic Closed Loop Speed Control of DC Motor. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2012;3(2):1–3. Available from: <https://studylib.net/doc/12914711/pwm-based-automatic-closed-loop-speed-control-of-dc-motor> [Accessed 23rd February 2019].
5. German-Galkin SG. *Pulse-Width Converters*. Leningrad: Energia; 1979, 96 p. (In Russ.)
6. Ivakhno V, Zamaruev VV, Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2013;2(1):20–26. <https://doi.org/10.2478/ecce-2013-0003>
7. Namboodiri A, Wani HS. Unipolar and Bipolar PWM Inverter. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*. 2014;1(7):237–243. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Unipolar-and-Bipolar-PWM-Inverter-Namboodiri-Wani/5e5bfeb21a0c42e3ce26519218df918052ebec88> [Accessed 23rd February 2019].
8. Joshi NP, Thakar AP. Speed Control of DC Motor Using Analog PWM. *Technique International Journal of Engineering & Technology*. 2012;1(9):1–5. Available from: <https://www.ijert.org/research/speed-control-of-dc-motor-using-analog-pwm-technique-IJERTV1IS9465.pdf> [Accessed 23rd February 2019].
9. Arsentiev OV, Arsentiev GO, Dunaev MP. Research of Energy Characteristics of Frequency-regulated Electric Drive. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2017;327:1–8. Available from: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052005>
10. Dunaev MP. *Resonant Inverters for Electric Drive Control*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2004, 103 p. (In Russ.)
11. Shreiner RT. *Mathematical Simulation of the AC Electric Drives with Semiconductor Frequency Converters*. Ekaterinburg: Ural branch of the Russian Academy of Sciences; 2000, 654 p. (In Russ.)
12. Bulatov OG, Tsarenko AI. *Thyristor-Capacitor Converters*. Moscow: Energoatomizdat; 1982, 217 p. (In Russ.)
13. Pulyakov AV, Dunaev MP, Arsentiev GO. Universal Control Method of Auxiliary Electric Motors. In: *Aviamechanical Engineering and Transport. Series: Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference*. 21–26 May 2018, Irkutsk. Irkutsk; 2018, vol. 158, p. 109–113. <https://dx.doi.org/10.2991/avent-18.2018.21>
14. Dunaev MP, Dovudov SU. Modeling a Pulse-Width Converter Circuit. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri: Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 22–26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, vol. 1, p. 3–6. (In Russ.)
15. Fedorova ZA, Fedorova SN. Analysis of differential block use in MATLAB simulation. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri: Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 22–26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, vol. 1, p. 88–93. (In Russ.)
16. Sathishkumar S, Nagarajan R, Yuvaraj R, Sridhar M, Elangovan M. Implementation of PWM Technique for Integrated High Gain Boost Resonant Converter. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2018;8(3):59–66.
17. Singh B, Bhatt R, Sharma A, Pandit S, Channi H. Modeling and Designing of Matlab Based Speed Control of DC Motor Using PWM Technique. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 2017;3(7):681–686. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.14399.82082>
18. Kazhura OA, Rudich OA, Sartakov VD. Analysing Simulation Methods of Dynamic Processes in Electric Circuits with One Power Unit using MATLAB Core. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyax Sibiri: Trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 22–26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, vol. 1, p. 26–31. (In Russ.)
19. Ilyshenko VV, Maitaev MZ. Calculation Method of Electric Vehicle Resonance Inverter. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii*



v usloviyax Sibiri: Trudy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii = Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia: Proceedings of All-Russian practical and scientific conference. 22–26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2019, vol. 1, p. 38–42. (In Russ.)

20. Dunaev MP, Dovudov SU. Modeling Pulse-

Frequency Converter Circuit. In: *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii: Tezisy 24 Baykal'skoy Vserossiyskoj konferentsii s mezhduнародnym uchastiyem* = Information and Mathematical Technologies in Science and Management: Abstracts of XXIV Baikal All-Russian Conference with International Participation. June 29 – July 8 2019, Irkutsk. Irkutsk; 2019, p. 28. (In Russ.)

Критерии авторства

Довудов С.У., Дунаев М.П. 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Довудов Сарфароз Умедович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: dsu_1991@mail.ru

Дунаев Михаил Павлович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электропривода и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: mdunaev10@mail.ru

Authorship criteria

Dovudov S.U., Dunaev M.P. 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.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sarfarozi U. Dovudov,
Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: dsu_1991@mail.ru

Mikhail P. Dunaev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: mdunaev10@mail.ru



Критерии выбора составов топлив при их сжигании в газотурбинных установках с незначительными переделками топливной системы

© Г.Е. Марьин***, Б.М. Осипов**

*АО «Татэнерго», филиал «Казанская ТЭЦ-2», г. Казань, Россия

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

Резюме: Целью данной работы является исследование критериев выбора составов топлив при их сжигании в газотурбинных установках с незначительными переделками топливной системы. При работе и пусках газотурбинных установок все параметры топлива должны удовлетворять требованиям по качеству. Основным видом топлива для газотурбинных установок, входящих в состав парогазовых установок, является природный газ. Однако газотурбинные установки обладают способностью сжигать широкий спектр газообразных топлив. Свойства каждого топлива могут существенно различаться из-за содержания основных компонентов и примесей в составе, что существенно влияет на состав продуктов сгорания, т.е. на его термодинамические свойства. Очевидно, что это влияние оказывается и на интегральные параметры газотурбинной установки. Серьезным параметром в этом случае является расходная характеристика топливного газа, т.к. система автоматического регулирования может устойчиво работать, выполняя свои функции, в определенном пределе этой расходной характеристики. Существуют специальные методики, например, индекс Воббе, который позволяет с определенной точностью рекомендовать применение того или иного топливного газа для данной газовой турбины без перенастройки системы автоматического регулирования. В данной работе в качестве исследуемой турбины выбрана газотурбинная установка GE PG111 6FA. Для исследования влияния топлива на характеристики турбины создана математическая модель. Для исключения повреждений камеры сгорания и тракта горячих газов необходимо выполнять требования по конденсации влаги и углеводородов в топливном газе, поэтому представлены зависимости конденсации углеводородов и влаги в топливном газе. Показано влияние значений индекса Воббе на работоспособность топливных систем газовой турбины, где допустимо использовать топливный газ, удовлетворяющий индексу Воббе. В работе рассмотрено 4 топливных газа, но только газ Степановского месторождения удовлетворяет требованиям индекса Воббе, его можно использовать взамен исходного без модернизации и переделки топливной системы.

Ключевые слова: парогазовая установка, газотурбинная установка, топливный газ, состав топлива, индекс Воббе, углеводороды

Информация о статье: Дата поступления 09 января 2020 г.; дата принятия к печати 03 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Марьин Г.Е., Осипов Б.М. Критерии выбора составов топлив при их сжигании в газотурбинных установках с незначительными переделками топливной системы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 356–365. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-356-365>

Choice criteria in the composition of fuel applied in gas turbine installations with minor fuel system modifications

Georgiy E. Marin, Boris M. Osipov

Tatenergo JSC Branch of Kazan TPP-2, Kazan, Russia,

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The present study is aimed at determining criteria for selecting the optimal composition of fuel applied in gas turbine installations while avoiding major alterations of the fuel system. During operation and commissioning of gas turbine units, all fuel parameters must meet quality requirements. Although the primary fuel used in gas turbine units included in combined-cycle plants is natural gas, it is possible to apply a wide range of gaseous fuels. Due to the content of the main components and impurities, the thermodynamic properties of each fuel can vary significantly, affecting the composition of the combustion products, as well as the integral parameters of the gas turbine installation. In this connection, since the automatic control system must reliably perform its functions within a certain limit of this characteristic, the

flow rate of the fuel gas comprises a critical parameter. The Wobbe index is applicable in technical approaches for approving the use of a particular fuel gas for a given gas turbine with a certain accuracy and without reconfiguring the automatic control system. In the present study, a GE PG111 6FA gas turbine unit was used. A mathematical model was created to study the effect of fuel variant on turbine performance. In order to eliminate damage of the combustion chamber and hot gas path, it is necessary to fulfil the requirements for condensation of moisture and hydrocarbons in the fuel gas. Therefore, condensation dependences for hydrocarbons and moisture in the fuel gas are also presented. In cases of acceptable application of fuel gases satisfying the Wobbe index, the effect of these values on the performance of gas turbine fuel systems is shown. Out of four types of gas fuels considered in the study, only the gas obtained from the Stanovskoye field met the requirements of the Wobbe index, allowing its substitution for the originally-intended fuel without necessitating alterations to the fuel system.

Keywords: combined cycle gas turbine, gas turbine plant, fuel gas, fuel composition, Wobbe index, hydrocarbons

Information about the article: Received January 09, 2020; accepted for publication March 03, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Marin GE, Osipov BM. Choice criteria in the composition of fuel applied in gas turbine installations with minor fuel system modifications. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):356–365. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-356-365>

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время парогазовые установки являются основным типом оборудования при модернизации оборудования теплоэлектростанций, а также источников новой генерации.

Основным видом топлива для газотурбинных установок (ГТУ), входящих в состав парогазовых установок, является природный газ. Однако газотурбинные установки обладают способностью сжигать широкий спектр газообразных топлив. Свойства каждого топлива могут существенно различаться из-за содержания основных компонентов и примесей в составе.

Основные условия при эксплуатации газовых турбин, которые должны быть выполнены независимо от вида используемого топлива:

- 1) устойчивость к самовозгоранию;
- 2) соответствие требованиям выбросов (NO_x , CO);
- 3) устойчивость к микровзрывам;
- 4) приемлемое динамическое давление при сгорании [1, 2].

Для соответствия таким рабочим требованиям при выборе камеры сгорания газовой турбины учитываются также параметры топлива: состав компонентов, теплотворная способность, уровень загрязнения топлива. До середины 70-х годов прошлого века обычным выбором по причине своей простоты для турбин были диффузионные

камеры сгорания. По мере того, как требования к выбросам становились жестче, диффузионные камеры сгорания модернизировались системами подвода воды или пара для уменьшения температуры и выбросов NO_x . Ужесточение требований по выбросам привело к внедрению камер предварительного смешивания «бедной» топливоздушная смеси. По мере развития технологий и требований более низкого количества выбросов некоторые модели и системы камер сгорания стали подлежать ограничениям по физическим и химическим свойствам используемого топливного газа для эффективного и безопасного сжигания такого топлива. Указанные ограничения постоянно обновляются по мере развития технологий газотурбостроения [3–5].

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТОПЛИВНЫХ ГАЗОВ

Основным видом топлива, используемого в качестве топливного газа (табл. 1) газовых турбин, является природный газ. Теплотворная способность природного газа находится в диапазоне от 29,304 до 109,968 кДж/м³ (7115 до 26700 ккал/м³). Действительная теплотворная способность зависит от содержания в газе углеводородов и инертных газов [6–9].

Природные газы извлекают из подземных месторождений. Эти «сырые» газы могут содержать различные компоненты,



такие как азот, углекислый газ, сероводород, песок, вода. Сжиженный природный газ (СПГ) транспортируется и хранится в жидком состоянии. В его составе отсутствуют инертные газы и влага, поэтому он является высококачественным природным газом. Альтернативой может служить сжиженный углеводородный газ (СУГ), но его высокая коммерческая стоимость позволяет использовать данный вид топлива только в качестве резервного.

В настоящее время все большее распространение получает топливо, которое производится при помощи процесса газификации с продувкой кислородом или воздухом, в качестве исходного сырья используются уголь, нефтяной кокс и тяжелые жидкости. У таких топлив теплотворная способность ниже, чем у других топливных газов. Для работы газовой турбины необходима модернизация топливной системы, а также специальные топливные форсунки.

Обособленной группой стоят техни-

ческие газы, они образуются в результате химических процессов и могут быть использованы в качестве топливного газа ГТУ, например, хвостовой или нефтезаводской газ. Эти газы часто состоят из метана, водорода, угарного газа, этана, пропана, углекислого газа, которые обычно являются побочными продуктами нефтехимического производства. Имея в качестве компонентов водород и угарный газ, данное топливо характеризуется большим пределом воспламеняемости. Доменные газы имеют очень низкую теплотворную способность, поэтому их необходимо смешивать с другим топливным газом, чтобы поднять теплотворную способность. Коксовые газы богаты водородом и метаном, содержат следы тяжелых углеводородов. Данный топливный газ обязательно должен быть очищен от тяжелых углеводородов перед подачей в топливную систему газовой турбины [10–12].

Таблица 1

Классификация топливных газов

Table 1

Fuel gas classification

Топливный газ	Низшая теплотворная способность, кДж/м ³ (ккал/м ³)	Теплота сгорания топлива, кДж/м ³	Компонент
Природный газ, сжиженный природный газ	29,78–44,798 (7115–10700)	29,78–44,78	метан
Сжиженный углеводородный газ	85,829–95,877 (20500–22900)	85,81–119,1	пропан, бутан
Газ, полученный в процессе газификации: – продуваемый воздухом; – продуваемый кислородом	3,722–5,652 (889–1350)	3,72–5,65	угарный газ, водород, азот, водяной пар
	7,452–15,072 (1780–3600)	7,45–15,06	
Технологический газ	11,304–111,787 (2700–26700)	11,3–111,76	метан, водород, угарный газ, этан, этилен, пропан, азот, углекислый газ

3. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТОПЛИВА

Теплотворная способность является основной и самой важной характеристикой топлива. Теплотворная способность топливного газа может быть определена экспериментально с помощью калориметра, в котором сжигается топливо в присутствии воздуха при постоянном давлении. Продукты остывают до исходной температуры, после чего производится измерение [13–15].

Требование по конденсации углеводородов и влаги топливного газа является важным критерием оценки топлива для ГТУ. Данное требование установлено для того, чтобы гарантировать полное отсутствие жидкости в подаваемом в газовую турбину топливе. Данное требование не зависит от концентрации углеводородов. В зависимости от компонентов газа жидкости, связанных с газом, могут привести к разрушению топливных форсунок. Конденсация влаги недопустима, т.к. ведет к образованию газовых гидратов и сбору конденсата в нижних точках топливной системы.

Требования по конденсации углеводородов описывается зависимостью, показанной на рис. 1.

Чтобы избежать конденсации влаги в исследуемой точке, необходимо учитывать требование по конденсации влаги в

топливе. На рис. 2 представлена зависимость конденсации влаги в топливном газе.

Точка конденсации углеводорода – температура, при которой образуется «первая капля» углеводорода при уменьшении температуры газа при заданном давлении, она аналогична точке конденсации влаги. Данная точка будет определять минимальную допустимую температуру газового топлива, подаваемого в топливную систему газовой турбины. В некоторых случаях точка конденсации углеводородов может быть столь низкой, что требование по конденсации влаги станет иметь решающее значение.

Точка конденсации влаги топливного газа зависит от концентрации влаги и давления газового топлива. Максимальное допустимое содержание влаги ограничивают 112 кг/м^3 , хотя фактическое значение чаще всего значительно меньше.

Индекс воспламеняемости. Топливные газы, содержащие водород, угарный газ, с большим содержанием инертных газов, будут иметь высокое соотношение верхнего и нижнего предела воспламеняемости, т.е. границы воспламеняемости по «богатым» и «бедным» смесям сужаются по сравнению с природным газом, поэтому возможны проблемы поддержания стабильного горения во всем диапазоне работы газовой турбины [16, с. 27–49].

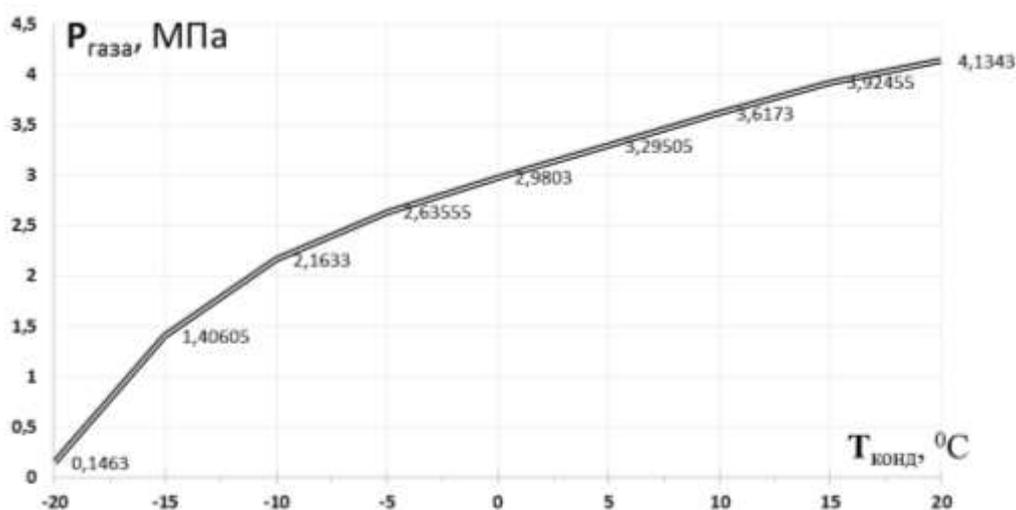


Рис. 1. Требования по конденсации углеводородов
Fig. 1. Requirements for hydrocarbon condensation



На графике (см. рис. 1) показаны сопряженные параметры температуры и давления газа, при которых не произойдет конденсация углеводородов.

Аппроксимальная зависимость выражена в следующем виде:

$$T_{\text{конд}}(P_{\text{газа}}) = 0,00009(P_{\text{газа}})^3 - 0,0005(P_{\text{газа}})^2 + 0,0637P_{\text{газа}} + 2,9803 - 0,000004(P_{\text{газа}})^4, \quad (1)$$

где $T_{\text{конд}}$ – требование конденсации для углеводородов в исследуемой точке; $P_{\text{газа}}$ – давление газа на входе в топливную систему газовой турбины.

На графике (см. рис. 2) показаны сопряженные параметры температуры и давления газа, при которых не произойдет конденсации влаги. Для стабильной работы необходимо подавать в топливную систему газ с параметрами выше точки конденсации.

Аппроксимальная зависимость выражена в следующем виде:

$$T_{\text{газа}}(P_{\text{газа}}) = 0,00007(P_{\text{газа}})^4 + 0,0029(P_{\text{газа}})^3 + 0,0346(P_{\text{газа}})^2 + 0,3918P_{\text{газа}} + 5,4149. \quad (2)$$

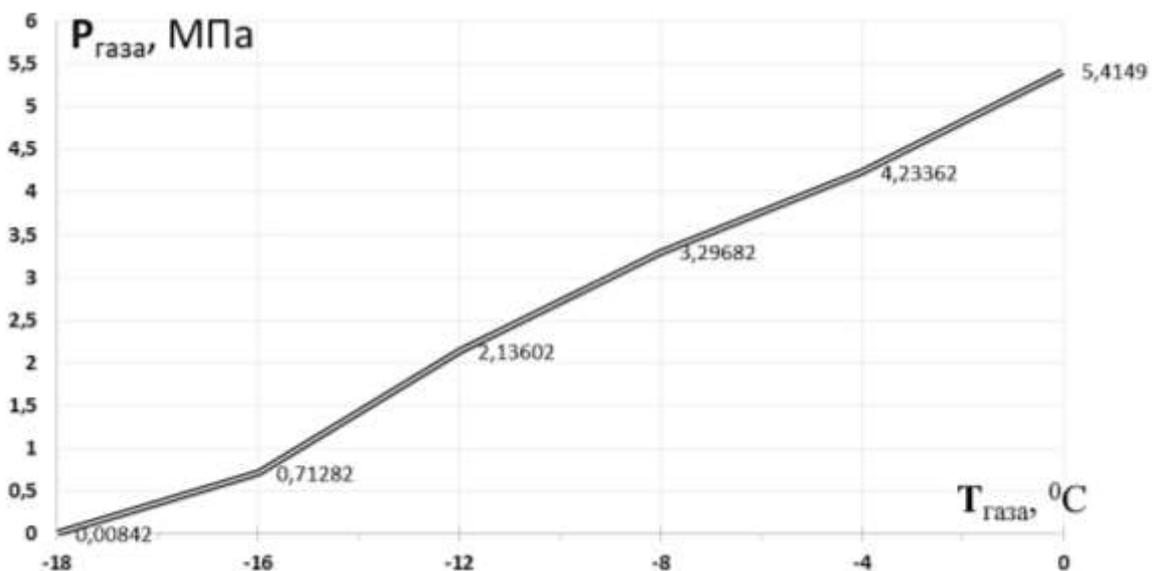


Рис. 2. Зависимость конденсации влаги в топливном газе
Fig. 2. Dependence of moisture condensation in fuel gas

Концентрация примесей в топливном газе – одна из составляющих, которую также необходимо учитывать. Поскольку не существует простого способа измерить концентрацию примесей, то значение этой величины должно быть вычислено:

$$W_{\text{прин}} = G_{\text{в}} \times W_{\text{в}} + G_{\text{топ}} \times W_{\text{топ}}, \quad (3)$$

где $G_{\text{в}}$ – расход воздуха, кг/с; $W_{\text{в}}$ – концентрация примесей в воздухе, кг/м³; $G_{\text{топ}}$ – расход топлива, кг/с; $W_{\text{топ}}$ – концентрация примесей в топливе, кг/м³.

Если же турбина со впрыском пара или воды в проточной части, то данное уравнение примет вид:

$$W_{\text{прин}} = G_{\text{в}} \times W_{\text{в}} + G_{\text{топ}} \times W_{\text{топ}} + G_{\text{пара}} \times W_{\text{пара}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{пара}}$ – расход пара, кг/с; $W_{\text{пара}}$ – концентрация примесей в паре, кг/м³.

$$W_{\text{прин}} = G_{\text{в}} \times W_{\text{в}} + G_{\text{топ}} \times W_{\text{топ}} + G_{\text{воды}} \times W_{\text{воды}}, \quad (5)$$

где $G_{\text{воды}}$ – расход воды, кг/с; $W_{\text{воды}}$ – концентрация примесей в воде, кг/м³.

Индекс Воббе. Газовые турбины могут работать на разных топливных газах, имеющих очень большой разброс в числовом значении теплотворной способности, но конкретная топливная система может работать в определенной узкой области значений. Изменение состава газа приводит к изменению теплотворной способности, что ведет к необходимости изменения количества форсунок, их типа, температуры и давления подаваемого в топливную систему газа.

Степень взаимозаменяемости газообразных видов топлива для топливной системы газовой турбины измеряется индексом Воббе (W_n , МДж/м³) [17–19].

Данный показатель является относительной мерой энергии, инжектируемый в камеру сгорания газ с фиксированным давлением высчитывается при использовании значения низшей теплотворной способности топлива, удельной плотности относительно воздуха и температуры топлива. Для идеального топлива индекс Воббе рассчитывается:

$$W_n = \frac{H_u}{\sqrt{\frac{\mu_g}{28,96} \cdot T_g}},$$

где H_u – низшая теплотворная способность;
 μ_g – молекулярная масса газового топлива;
 T_g – температура газового топлива.

Если учитывать удельную плотность газа, то индекс Воббе примет вид

$$W_n = \frac{H_u}{\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_a}}},$$

где ρ_g – плотность газа, ρ_a – плотность воздуха.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований влияния топливного газа на работу газовой турбины была создана математическая модель газовой турбины GE PG111 6FA в АС ГРЭТ¹ [20]. В связи с тем, что данная газовая турбина работает в составе энергоблока ПГУ-110МВт, необходимо поддерживать постоянную мощность и температуру на выходе с ГТУ при базовой нагрузке. Значения основных параметров ГТУ при работе на стандартном топливе:

- 1) температура на входе в двигатель 288,15 К (15°C);
- 2) давление на входе в двигатель 0,1013 МПа;
- 3) суммарный расход воздуха на входе в двигатель 210 кг/с;
- 4) мощность 77000 кВт;
- 5) КПД 35,73%;
- 6) температура на выходе из двигателя 874 К (600,85°C).

Тепловой расчет газотурбинного двигателя производится на топливном газе разных месторождений. Состав топливного газа представлен в табл. 2, в результате расчетов получены основные характеристики ГТУ, представленные в табл. 3.

В табл. 4 представлены полученные значения и отклонения индекса Воббе.

Допустимый диапазон изменения индекса Воббе задается так, чтобы гарантировать правильную работу топливной системы в эксплуатации турбины. При использовании нескольких видов газообразного топлива, например, основного и резервного, необходимо учитывать отклонение индекса Воббе. Допустимый диапазон изменения значений индекса Воббе $\pm 5\%$, что позволяет работать газовой турбине в допустимых пределах изменения выбросов и динамики горения, расхода топливного газа, при большем отклонении турбина не будет работать в оптимальном режиме.

¹ Осипов Б.М., Титов А.В. Автоматизированная система газодинамических расчетов энергетических турбомашин: учеб. пособ. Казань: Изд-во КГЭУ, 2012. 277 с.



Таблица 2

Состав топливного газа

Table 2

Fuel gas composition

Содержание компонента, %	Формула	Топливный газ КТЭЦ-2*	Месторождение		
			Степановское	Заполярное	Крапивинское
Метан	CH ₄	94,44	95,100	87,895	58,015
Этан	C ₂ H ₆	3,16	2,300	5,260	9,270
Пропан	C ₃ H ₈	1,09	0,700	2,130	13,300
Изобутан	C ₄ H ₁₀	0,464	1,200	1,270	12,410
Кислород	O ₂	0,005	0,025	0,025	0,025
Азот	N ₂	0,625	0,475	2,440	4,890
Диоксид углерода	CO ₂	0,216	0,200	0,980	2,090

*Казанская ТЭЦ-2

Таблица 3

Основные характеристики газотурбинных установок

Table 3

Main characteristics of gas turbine plants

Компонент	Топливный газ КТЭЦ-2	Месторождение		
		Степановское	Заполярное	Крапивинское
Температура на входе в двигатель, К	288,15	288,15	288,15	288,15
Давление на входе в двигатель, МПа	0,1013	0,1013	0,1013	0,1013
КПД, %	35,73	35,15	33,6	31,6
Мощность, кВт	77000	77000	77000	77000
Суммарный расход воздуха на входе в двигатель, кг/ч (кг/с)	756000 (210)	767520 (213,2)	744840 (206,9)	735120 (204,2)
Суммарный часовой расход топлива, кг/ч	16687,8	17701,1	20940,33	37754,26

Таблица 4

Значения индекса Воббе

Table 4

Wobbe index values

Параметр	Топливный газ КТЭЦ-2	Месторождение		
		Степановское	Заполярье	Крапивинское
Индекс Воббе, МДж/м ³	49,70	49,65	51,9	67,9
Отклонения в значениях индекса Воббе, %	0	1,006	8,451	26,804

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При работе и пусках газотурбинных установок все параметры топлива должны удовлетворять требованиям по качеству.

2. Топливный газ должен быть подготовлен (очищен) перед использованием в качестве топлива газовой турбины.

3. Для исключения повреждений камеры сгорания и тракта горячих газов

необходимо выполнять требования по конденсации влаги и углеводородов в топливном газе.

4. Допустимо использовать топливный газ, удовлетворяющий индексу Воббе. В работе рассмотрено 4 топливных газа, но только газ Степановского месторождения удовлетворяет требованиям индекса Воббе, его можно использовать взамен исходного топлива без модернизации и переделки топливной системы.

Библиографический список

1. Бакланов А.В., Неумоин С.П., Маркушин А.Н. Оценка возможных режимов работы ГТУ НК-16СТ при использовании в качестве топлива попутного нефтяного газа // Газовая промышленность. 2017. Т. 752. № 5. С. 80–86.

2. De Vries H., Mokhov A.V., Levinsky H.B. The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end-use equipment: Interchangeability analysis for domestic appliances // Applied Energy. 2017. Vol. 208. P. 1007–1019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.049>

3. Менделеев Д.И., Галицкий Ю.Я., Марьин Г.Е., Федотов А.Ю. Особенности работы ПГУ-220 Казанской ТЭЦ-2 по заданному графику // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы IX Международной молодежной науч.-техн. конф. (г. Казань, 1–5 октября 2018 г.). Казань: Изд-во КГЭУ, 2018. Т. 3. С. 307–310.

4. Cho H.M., He Bang-Quan. Combustion and emission characteristics of a lean burn natural gas engine // International Journal of Automotive Technology. 2008. Vol. 9. No. 4. P. 415–422. <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0050-5>

5. Lokini P., Roshan D.K., Kushari A. Influence of Swirl and Primary Zone Airflow Rate on the Emissions and Performance of a Liquid-Fueled Gas Turbine Combustor // Journal of Energy Resources Technology. 2019. Vol. 141. Issue 6. P. 062009. <https://doi.org/10.1115/1.4042410>

6. Marin G.E., Mendeleev D.I., Akhmetshin A.R. Analysis of Changes in the Thermophysical Parameters of

the Gas Turbine Unit Working Fluid Depending on the Fuel Gas Composition // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) (Vladivostok, 1–4 October 2019). Vladivostok: IEEE, 2019. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934021>

7. Pujihatma P., Hadi S.P., Sarjiya, Rohmat T.A. Combined heat and power – multi-objective optimization with an associated petroleum and wet gas utilization constraint // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. Vol. 54. P. 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.03.025>

8. Сорока Б.С., Воробьев Н.В. Эффективность использования газового топлива и окислительной смеси при их увлажнении // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 6. P. 547–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564>

9. Сорока Б.С. Влияние климатических факторов на теплотехнические характеристики, энергетическую эффективность и оценка экологических последствий сжигания газового топлива // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 4-6. С. 116–129. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.04-06.116-129>

10. Mehrpanahi A., Payganeh G.H. Multi-Objective Optimization of IGV Position in a Heavy-duty Gas Turbine on Part-Load Performance // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 125. P. 1478–1489. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.091>

11. Lukai Zheng, Cronly J., Ubogu E., Ahmed I., Yang Zhang, Khandelwal B. Experimental Investigation



on Alternative Fuel Combustion Performance Using a Gas Turbine Combustor // *Applied Energy*. 2019. Vol. 238. P. 1530–1542. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.175>

12. Lukai Zheng, Chenxing Ling, Ubogu E.A., Cronly J., Ahmed I., Yang Zhang, et al. Effects of Alternative Fuel Properties on Particulate Produced in a Gas Turbine Combustor // *Energy Fuels*. 2018. Vol. 32. No. 9. P. 9883–9897. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01442>

13. Esclapez L., Ma P.C., Mayhew E., Rui Xu, Stouffer S., Tonghun Lee, et al. Fuel effects on lean blow-out in a realistic gas turbine combustor // *Combustion and Flame*. 2017. Vol. 181. P. 82–99. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.035>

14. Батрамеев В.А., Илясов Л.В. Математическая модель сигнала анализатора низшей объемной теплоты сгорания газобразных топлив // *Вестник Тверского государственного технического университета*, 2011. № 19. С. 79–83.

15. Батрамеев В.А., Варламов А.П., Илясов Л.В. Лабораторный анализатор низшей объемной теплоты сгорания газов // *Технологии нефти и газа*. 2012. № 2. С. 61–64.

16. Madhlopa A. Principles of Solar Gas Turbines for Electricity Generation // *Green Energy and Technology*. New York: Springer, 2018. 217 p.

17. Jinlong Liu, Dumitrescu C.E. Numerical Investigation of Methane Number and Wobbe Index Effects in Lean-Burn Natural Gas Spark-Ignition Combustion // *Energy Fuels*. 2019. Vol. 33. No. 5. P. 4564–4574. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04463>

18. Shaker M., Sundfor E., Farine G., Slater C., Farine P.A., Briand D. Design and Optimization of a Low Power and Fast Response Viscometer Used for Determination of the Natural Gas Wobbe Index // *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol. 19. No. 23. P. 10999–11006. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2928479>

19. Roy P.S., Ryu Ch., Chan Seung Park. Predicting Wobbe Index and methane number of a renewable natural gas by the measurement of simple physical properties // *Fuel*. 2018. Vol. 224. P. 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.074>

20. Титов А.В., Осипов Б.М. Инструментальная среда для исследования газотурбинных установок на математических моделях // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2017. № 4 (36). С. 17–21.

References

1. Baklanov AV, Neumoin SP, Markushin AN. Assessment of Possible Operating Regimes of a Gas Turbine Plant НК-16СТ When Using Associated Petroleum Gas as Fuel. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry Magazine*. 2017;752(5):80–86. (In Russ.)

2. De Vries H, Mokhov AV, Levinsky HB. The Impact of Natural Gas/Hydrogen Mixtures on the Performance of End-Use Equipment: Interchangeability Analysis for Domestic Appliances. *Applied Energy*. 2017;208:1007–1019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.0493>

3. Mendeleev DI, Galickij YuYa, Marin GE, Fedotov AYu. Operation Features of Kazan CHPP-2 CCGT-220 according to a Given Schedule. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: materialy IX Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Electric Power Engineering through the Eyes of Youth - 2018: Materials of IX International Youth Scientific and Technical Conference*. 1–5 October 2018, Kazan. Kazan State Power Engineering University; 2018, vol. 3, p. 307–310. (In Russ.)

4. Cho HM, He Bang-Quan. Combustion and Emission Characteristics of a Lean Burn Natural Gas Engine. *International Journal of Automotive Technology*. 2008;9(4):415–422. <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0050-5>

5. Lokini P, Roshan DK, Kushari A. 5. Lokini P, Roshan DK, Kushari A. Influence of Swirl and Primary Zone Airflow Rate on the Emissions and Performance of a Liquid-Fueled Gas Turbine Combustor. *Journal of Energy Resources Technology*. 2019;141(6):062009. <https://doi.org/10.1115/1.4042410>

6. Marin GE, Mendeleev DI, Akhmetshin AR. Analysis of Changes in the Thermophysical Parameters of the

Gas Turbine Unit Working Fluid Depending on the Fuel Gas Composition. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 1–4 October 2019, Vladivostok. Vladivostok: IEEE; 2019, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934021>

7. Pujihatma P, Hadi SP, Sarjiya, Rohmat TA. Combined Heat and Power – Multi-objective Optimization with an Associated Petroleum and Wet Gas Utilization Constraint. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018;54:25–36. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.03.025>

8. Soroka BS, Vorobyov NV. Efficiency of the Use of Humidified Gas Fuel and Oxidizing Mixture. *Izvestia vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika = ENERGETIKA*. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. 2019;62(6):547–564. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564>

9. Soroka BS. Soroka B.S. Climate Factors Influence over Heat Engineering Characteristics, Energy Efficiency and Evaluation of Environmental Consequences of Gas Fuel Combustion. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2017;4-6:116–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.04-06.116-129>

10. Mehrpanahi A, Payganeh GH. Multi-Objective Optimization of IGV Position in a Heavy-duty Gas Turbine on Part-Load Performance. *Applied Thermal Engineering*. 2017;125:1478–1489. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.091>

11. Lukai Zheng, Cronly J, Ubogu E, Ahmed I, Yang

Zhang, Khandelwal B. Experimental Investigation on Alternative Fuel Combustion Performance Using a Gas Turbine Combustor. *Applied Energy*. 2019;238:1530–1542. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.175>

12. Lukai Zheng, Chenxing Ling, Ubogu EA, Cronly J, Ahmed I, Yang Zhang, et al. Effects of Alternative Fuel Properties on Particulate Produced in a Gas Turbine Combustor. *Energy Fuels*. 2018;32:9:9883–9897. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01442>

13. Esclapez L, Ma PC, Mayhew E, Rui Xu, Stouffer S, Tonghun Lee, et al. Fuel Effects on Lean Blow-Out in a Realistic Gas Turbine Combustor. *Combustion and Flame*. 2017;181:82–99. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.02.035>

14. Batrameev VA, Ilyasov LV. Mathematical model of the gas low heat value analyzer signal. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of the Tver State Technical University. 2011;19:79–83. (In Russ.)

15. Batrameyev VA, Varlamov AP, Ilyasov LV. A Laboratory Analyzer of Gases Low Volumetric Combustion Heat. *Tekhnologii nefti i gaza* = Oil and Gas Technologies. 2012;79(2):61–64. (In Russ.)

Критерии авторства

Марьин Г.Е., Осипов Б.М. 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Марьин Георгий Евгеньевич,
старший машинист энергоблоков
цеха парогазовых установок,
АО «Татэнерго», филиал «Казанская ТЭЦ–2»,
420021, г. Казань, ул. Салимжанова, 1, Россия;
старший преподаватель кафедры энергетического
машиностроения,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
✉ e-mail: george64199@mail.ru

Осипов Борис Михайлович,
кандидат технических наук, профессор,
профессор кафедры энергетического
машиностроения,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;
e-mail: obm0099@ya.ru

16. Madhlopa A. Principles of Solar Gas Turbines for Electricity Generation. In: *Green Energy and Technology*. New York: Springer; 2018, 217 p.

17. Jinlong Liu, Dumitrescu C.E. Numerical Investigation of Methane Number and Wobbe Index Effects in Lean-Burn Natural Gas Spark-Ignition Combustion. *Energy Fuels*. 2019;33(5):4564–4574. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04463>

18. Shaker M, Sundfor E, Farine G, Slater C, Farine PA, Briand D. Design and Optimization of a Low Power and Fast Response Viscometer Used for Determination of the Natural Gas Wobbe Index. *IEEE Sensors Journal*. 2019;19(23):10999–11006. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2928479>

19. Roy PS, Ryu Ch, Chan Seung Park. Predicting Wobbe Index and Methane Number of a Renewable Natural Gas by the Measurement of Simple Physical Properties. *Fuel*. 2018;224:121–127. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.074>

20. Titov AV, Osipov BM. Instrumental Medium for Gas Turbine Research on Mathematical Models. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2017;4;17–21. (In Russ.)

Authorship criteria

Marin G.E., Osipov B.M. 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.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgiy E. Marin,
Senior Control Room Operator of the Combined
Cycle Plant of
Tatenergo JSC Branch of Kazan TPP-2,
1 Salimzhanov St., Kazan 420021, Russia;
Senior Lecturer of the Department
of Power Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
✉ e-mail: george64199@mail.ru

Boris M. Osipov,
Cand. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;
e-mail: obm0099@ya.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.316.72

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-366-381>

Анализ факторов, влияющих на совокупное электропотребление гарантирующего поставщика

© Н.А. Серебряков

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Резюме: Цель работы – рассмотреть вопросы формирования выборки данных, необходимой для обучения и тестирования нейросетевых алгоритмов краткосрочного прогнозирования электропотребления, на основании анализа факторов, влияющих на поведение временного ряда электрической нагрузки потребителей гарантирующего поставщика. В данном исследовании использованы методы математической статистики, корреляционного и факторного анализов. Рассмотрено влияние факторов времени, метеорологических условий, надежности электросетевого оборудования, режима работы крупных потребителей электроэнергии, наличия центрального отопления и водоснабжения в населенном пункте на электрическую нагрузку потребителей гарантирующего поставщика. Осуществлен отбор основных факторов, оказывающих решающее воздействие на поведение временного ряда потребления электроэнергии. Выполнено объединение нескольких факторов в один с целью снижения размерности факторного пространства. Рассмотрены вопросы формирования выборки статистических данных, необходимой для краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии с помощью инструментов искусственного интеллекта и машинного обучения. На основании данной выборки происходит обучение и тестирование прогнозных моделей. Поведение временного ряда потребления электроэнергии в основном определяется временными и метеорологическими факторами. Для временного ряда электропотребления гарантирующего поставщика также определяющими являются факторы: отключение электросетевого оборудования 6–220 кВ; режим работы потребителей электроэнергии с мощностью 670–10000 кВт; наличие центрального отопления и водоснабжения в отдельном населенном пункте, которые считаются незначительными для электрической нагрузки энергосистемы в целом. При рассмотрении группы метеорологических факторов выяснено, что на почасовые объемы электропотребления влияет не только величина температуры наружного воздуха, но и изменения температурного режима, происходящие в предшествующий период.

Ключевые слова: краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии, факторы, искусственный интеллект, обучающая выборка, группа точек поставки электроэнергии, оптовый рынок электроэнергии и мощности

Информация о статье: Дата поступления 24 октября 2019 г.; дата принятия к печати 19 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Серебряков Н.А. Анализ факторов, влияющих на совокупное электропотребление гарантирующего поставщика. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 366–381. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-366-381>

Analysis of factors affecting the electricity consumption of a delivery point cluster default provider

Nikolay A. Serebryakov

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Abstract: This paper considers data retrieval issues associated with the training and testing neural network algorithms for electric load short-term forecasting based on the analysis of factors affecting the behaviour of the time series of the electric load of default provider consumers. The study uses mathematical-statistical, correlation and factor analysis methods. In the context of district central heating and water supply, the paper considers the influence of time factors, meteorological conditions, reliability of power grid equipment and the operation mode of large electric energy consumers on the electric load of default provider consumers. The main factors having a decisive effect on the time-series behaviour of electric energy consumption are identified. In order to reduce the dimension of the space factor, several factors are combined into one. Issues concerning the sampling of statistical data necessary for short-term forecasting of electric energy consumption using artificial intelligence and machine learning tools are considered. The sample is then used as a basis for the training and testing of predictive models. The behaviour of electric energy consumption time series is mainly determined by temporal and meteorological factors. The following factors are also determining for the electric load time series

of the delivery point cluster default provider: blackouts of 6-220 kV electric grid equipment, operation mode of consumers of 670-10000 kW electric energy, availability of central heating and water supply in a certain town or settlement. However, these factors are considered insignificant for the electrical load of the energy system as a whole. Having considered the group of meteorological factors, we found that hourly volumes of power consumption are affected not only by the temperature of the outside air, but also by the variations in the temperature regime having occurred in the previous period.

Keywords: short-term load forecasting, factors, artificial intelligence, training sample, electric energy delivery point cluster, wholesale electricity market

Information about the article: Received October 24, 2019; accepted for publication February 19, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Serebryakov NA. Analysis of factors affecting the electricity consumption of a delivery point cluster default provider. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):366–381. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-366-381>

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных реалиях большая часть объемов электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) регулируется с помощью рыночных механизмов «рынка на сутки вперед» (РСВ) и «балансирующего рынка» (БР). В условиях функционирования рынка электроэнергии точность прогнозов потребления существенно влияет на технологические и экономические показатели энергосистемы [1]. Результаты краткосрочных прогнозов электропотребления крупных потребителей электроэнергии учитываются системным оператором Единой энергетической системы (СО ЕЭС) при принятии решений по управлению энергосистемой. Ошибки прогнозирования, как правило, приводят к необоснованным пускам и остановам генерирующего оборудования, а также к выбору неоптимальной схемы электрических сетей.

Реформа мирового рынка электроэнергии заставляет энергетическую отрасль постепенно трансформироваться от монополии к конкуренции. Как участники рынка, каждый поставщик и потребитель хотят получить наибольшую выгоду от оборота электроэнергии [2]. Ценовая конъюнктура на ОРЭМ складывается так, чтобы стимулировать крупных покупателей электроэнергии (гарантирующих поставщиков) придерживаться собственных прогнозов. В данной статье анализу подвергается вре-

менной ряд электропотребления заказчиков гарантирующих поставщиков, указанных в «Основных положениях функционирования розничных рынков электрической энергии»¹. Группа точек поставки электроэнергии является условной точкой в энергосистеме, предназначенной для фиксации суммарных объемов электроэнергии, потребленной заказчиками на розничном рынке электроэнергии. Для достижения адекватных финансовых результатов гарантирующим поставщикам необходимо прогнозировать собственное почасовое электропотребление заказчиков по всем группам точек поставки электроэнергии (ГТП) на ОРЭМ с высокой точностью.

Также заблаговременная оценка надежности является необходимым условием для функционирования и развития современных электроэнергетических систем (ЭЭС), которые характеризуются развитием распределенной генерации возобновляемых источников энергии, интеллектуализацией, что усложняет ЭЭС и вносит свои коррективы в процесс оценки надежности ЭЭС [3]. Кроме того, растущая доступность возобновляемых источников энергии увеличивает нестабильность баланса мощности энергосистемы, поскольку появляется дополнительной неопределенностью на стороне производства электроэнергии [4, 5]. Совокупность данных факторов делает краткосрочное прогнозирование электропотребления (от англ. short-term

¹О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: постановление Правительства Российской Федерации № 442 от 04.06.2012 г.



load forecasting – STLF) критическим аспектом обеспечения надежности и эффективности энергосистемы [3].

Наиболее эффективным путем повышения точности STLF является формализация данного процесса. Достижение высокой точности прогнозирования затруднено наличием множества факторов, влияющих на электрическую нагрузку [6]. Наличие множества факторов, влияющих на потребление электроэнергии, а также стохастический характер некоторых из них, делают задачу STLF слабоформализуемой. В условиях неопределенности традиционные методы математической статистики или имитационного моделирования не позволяют строить адекватные модели объектов [7]. Способность к обобщению информации, описывающей нелинейные зависимости в сложных объектах, процессах и явлениях – неотъемлемая черта искусственных нейронных сетей, присущая им по внутренней природе, структуре и способу функционирования на основе обучения [8]. Несмотря на то, что теоретическая основа для применения нейросетевых алгоритмов была разработана еще во второй половине XX в., до недавнего времени применение инструментов машинного обучения для решения задачи STLF сдерживалось недостатком вычислительной мощности ЭВМ.

За последние несколько десятилетий ученые разработали множество методов повышения точности STLF, которые можно разделить на методы математической статистики, искусственного интеллекта и гибридные методы [3, 6]. Невзирая на большое количество существующих алгоритмов краткосрочного прогнозирования электропотребления, ни один из них нельзя назвать универсальным. В работах [9–21] применены устаревшие алгоритмы машинного обучения, такие как метод опорных векторов и главных компонент. В настоящее время передовые позиции в машинном обучении занимают алгоритмы глубоких нейронных сетей: многослойные перцептроны, сверточные нейронные сети и рекуррентные нейронные сети. Данные алгоритмы показывают лучшие результаты при

решении практических задач распознавания образов, прогнозирования временных рядов, аппроксимации функций и т.д. Также точность краткосрочного прогнозирования зависит как от математического алгоритма прогнозирования, так и от набора связанных статистических данных [9]. Существующие математические модели электропотребления энергосистем [1, 12, 14] не учитывают ряд факторов, который оказывает значительное влияние на временной ряд совокупного электропотребления заказчиков гарантирующих поставщиков:

- отключение на сетевом оборудовании 6–220 кВ;
- режим работы потребителей электроэнергии с мощностью свыше 670 кВт;
- наличие центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения в отдельном населенном пункте.

Выбору основных влияющих факторов уделяется особое внимание при использовании средств искусственного интеллекта для прогнозирования электрических нагрузок. В случае если учтены не все факторы, прогнозная модель не сможет адекватно описать поведение временного ряда электропотребления. В то же время учет второстепенных факторов вызовет необоснованное увеличение размерности факторного пространства. Это, в свою очередь, приведет к усложнению прогнозных модели и значительному увеличению затрат вычислительной мощности на ее обучение.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ ГАРАНТИРУЮЩЕГО ПОСТАВЩИКА

Точность прогнозирования зависит не только от эффективности используемых алгоритмов, но также от качества проанализированных данных и возможности включить важные внешние факторы в модель [10]. Статистические подходы к STLF обычно нуждаются в математической модели, которая представляет электрическую нагрузку как функцию различных факторов, таких как время, погода и класс потребите-

лей [11]. Предварительным этапом прогнозирования любого временного ряда является анализ факторов, влияющих на поведение данной функциональной зависимости. В случае прогнозирования временного ряда электропотребления ГТП гарантирующего поставщика с помощью инструментов искусственных нейронных сетей (ИНС) данный анализ приобретает особое значение. Качество обучающей выборки, состоящей из статистических данных о величинах основных влияющих факторов, напрямую влияет на точность STLF, полученного с помощью ИНС. Выбор высококоррелированных входных данных имеет ключевое значение для моделей прогнозирования потребления электроэнергии, построенных на основе искусственного интеллекта [12].

В первую очередь необходимо определить набор факторов, которые могут оказать воздействие на режим потребления электроэнергии ГТП. Число факторов влияет не только на способность нейронной сети к прогнозированию поведения временного ряда электрической нагрузки ГТП, но и на конфигурацию ИНС. То есть недостаток учтенных факторов не позволит ИНС адекватно описать поведение временного ряда, а наличие в обучающей выборке закоррелированных факторов или факторов, не оказывающих заметного влияния на поведение ряда, приведет к необоснованному увеличению свободных параметров ИНС. Это, в свою очередь, обусловит значительное увеличение времени обучения нейронной сети за счет дополнительных затрат вычислительной мощности на операции с большими матричными массивами, описывающими прохождение сигнала через ИНС.

Факторы, влияющие на режим потребления электроэнергии ГТП гарантирующего поставщика (ГП), подразделяются на учитываемые:

- сезонные и циклические изменения временного ряда электропотребления (форма суточного графика электрической нагрузки ГТП (СГЭН) в различные дни недели, время года, а также в праздничные дни);
- метеорологическую обстановку (величины температуры наружного возду-

ха, освещенности, скорости ветра и т.д.);

- случайные и условно-детерминированные воздействия на временной ряд (плановые и аварийные отключения на электросетевом оборудовании, отключение горячего и холодного водоснабжения, начало и конец отопительного сезона, режим работы крупных потребителей электроэнергии ГП, начало и конец сезонных работ);

- экономическую ситуацию в регионе или стране в целом.

Из вышеперечисленных групп факторов при краткосрочном прогнозировании электропотребления необходимо учитывать циклические, метеорологические и случайные воздействия. Экономические факторы не оказывают заметного влияния в краткосрочной перспективе. Учет данных факторов целесообразен при среднесрочном и долгосрочном прогнозировании электрических нагрузок. Детальное понимание факторов, влияющих на спрос электроэнергии, может помочь смягчить последствия от нестабильности производства электроэнергии за счет тарифного стимулирования потребления электроэнергии в определенные часы суток [4].

3. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ПОВЕДЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ГАРАНТИРУЮЩЕГО ПОСТАВЩИКА

Временные факторы обусловлены наличием циклических закономерностей в поведении временного ряда электрической нагрузки ГТП ГП различной длительности (сутки, неделя, год). Данная группа факторов обуславливает основные тенденции изменения СГЭН в течение определенного интервала времени. Знание отличительных особенностей изменения временного ряда в различные фазы цикла позволяет производить более качественную кластеризацию исходных данных при STLF. Целью кластеризации является разбиение исходных данных в однородные подмножества, называемые кластерами. Однородность

измеряется в соответствии с различными критериями, такими как внутриклассовые и межклассовые отклонения или меры различия [13].

Форма графиков носит циклический характер, электропотребление обладает сезонностью. Одной из циклических составляющих графика потребления является суточный цикл [14]. Суточный график потребления электроэнергии ГТП имеет ярко выраженные утренний и вечерний пики. Утренний пик обусловлен запуском основного оборудования промпредприятий, включением искусственного освещения в начале рабочего дня в школах, детских садах, поликлиниках и других учреждениях. Вечерний пик обусловлен активной подготовкой населения к предстоящему рабочему дню, включением искусственного освещения в домах и квартирах. Между пиками наблюдается относительное снижение электропотребления, которое обусловлено отключением искусственного освещения в светлое время суток, остановкой основного оборудования промпредприятий на обеденный перерыв.

При дальнейшем анализе можно выделить цикл длительностью одна неделя. СГЭН каждого дня недели имеет спе-

цифичную форму. На рис. 1 представлены суточные графики электропотребления АО «Алтайкрайэнерго» за период с 13 по 19 марта 2017 г.

Для наглядности выбрана неделя со схожими метеорологическими условиями на территории Алтайского края. Понедельник 13 марта отличается небольшой просадкой потребления электрической энергии в первые два часа суток, а также незначительным ростом электропотребления в дальнейшем. В начале рабочей недели происходят запуск, отладка и тестирование оборудования после простоя; понедельник имеет характерное для любого рабочего дня почасовое электропотребление; будние дни с 14 по 16 марта 2017 г. имеют схожие суточные графики электропотребления.

Пятница 17 марта 2017 г. (как конец рабочей недели) характеризуется просадкой электропотребления во второй половине суток. Данное явление обусловлено остановкой основного оборудования промышленных предприятий на выходные дни, а также отсутствием необходимости подготовки к следующему рабочему дню у большей части населения.

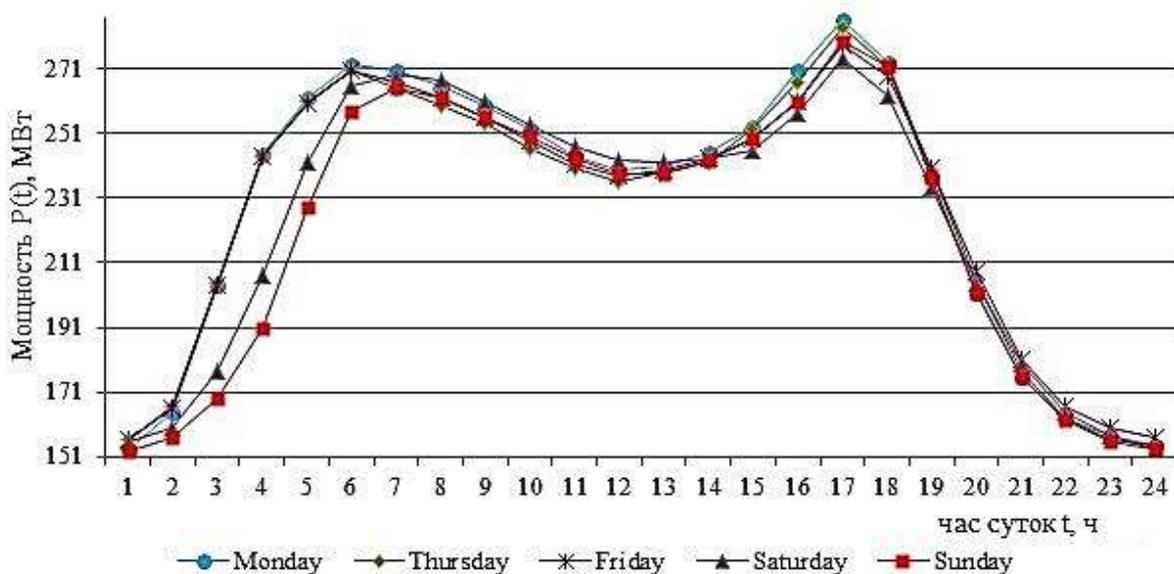


Рис. 1. Суточные графики электропотребления АО «Алтайкрайэнерго» в период с 13 по 19 марта 2017 г.

Fig. 1. Daily power consumption curves of Altaykrajenergo JSC for the period from March 13 to March 19, 2017

Как видим из рис. 1, СГЭН гарантирующего поставщика в выходные дни имеют нетипичную для будних дней форму, причем формы субботнего и воскресного СГЭН отличаются друг от друга. Утренний пик в субботу смещается на час вперед, в дневные часы электрическая нагрузка несколько увеличивается, по сравнению с рабочим днем. Население занимается домашними делами, которые накопились за рабочую неделю. Далее, во второй половине субботы и в первой половине воскресенья, происходит значительное снижение электропотребления, связанное с отдыхом населения перед предстоящей рабочей неделей. Электропотребление во второй половине воскресенья находится на уровне пятницы. Затем цикл повторяется вновь. Кластеризация данных по признаку дня недели является важнейшей задачей при STLF ГТП гарантирующих поставщиков электроэнергии.

Суточные графики потребления электроэнергии ГТП ГП постоянно изменяют свою форму в течение года. Это обусловлено сменой температуры воздуха, длительностью светлого времени суток, а также сезонными работами и т.д. Тенден-

ции изменения формы СГЭН ежегодно повторяются. На рис. 2 показаны суточные графики электропотребления АО «Алтайкрайэнерго» в различное время года.

На основании СГЭН на рис. 2 можно сделать вывод о том, что время утреннего пика электропотребления гарантирующего поставщика не изменяется в течение года. Смещение утреннего пика в летнее время года на час вперед обусловлено каникулами в образовательных учреждениях. Наряду с этим, время вечернего пика потребления электроэнергии постоянно изменяется, что обусловлено постоянным изменением момента наступления темного времени суток и включением искусственного освещения.

Также стоит отметить отсутствие просадки потребления электроэнергии после утреннего пика в период экстремально высоких температур. При увеличении среднесуточной температуры наружного воздуха выше 20°C появляется потребность включения «климатического» оборудования, такого как кондиционеры, вентиляторы, увлажнители воздуха. Во время работы данного оборудования значительно увеличивается электропотребление.

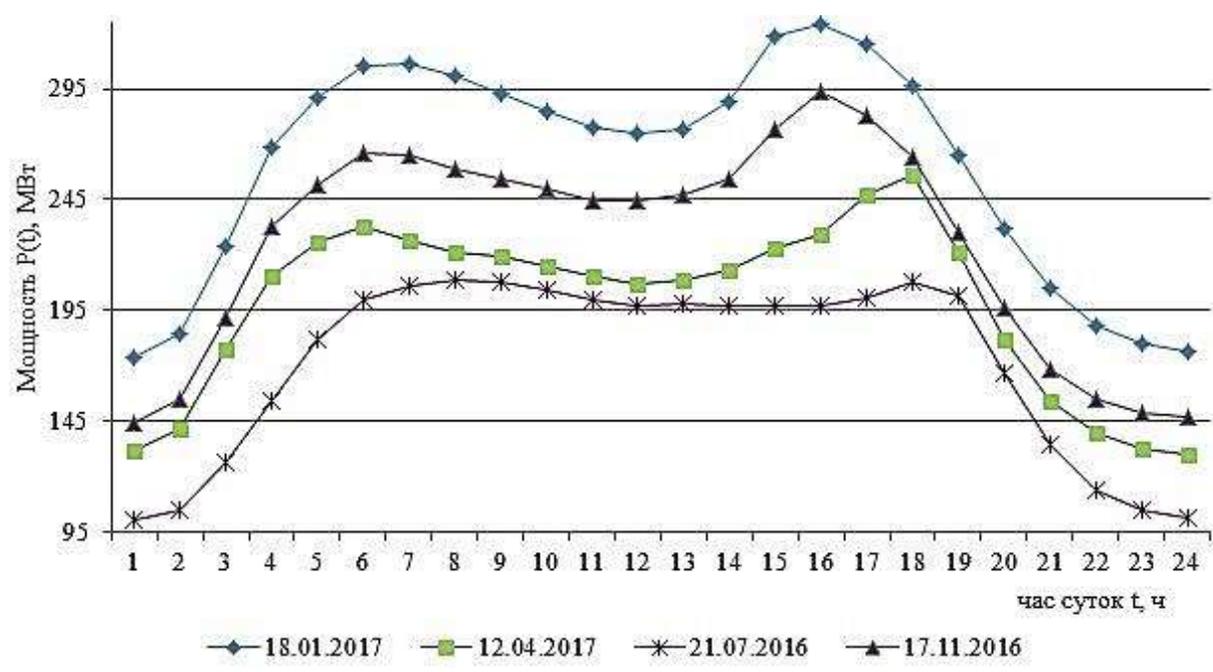


Рис. 2. Суточные графики потребления электроэнергии АО «Алтайкрайэнерго» в различные времена года
Fig. 2. Daily power consumption curves of Altaykrajenergo JSC in different seasons

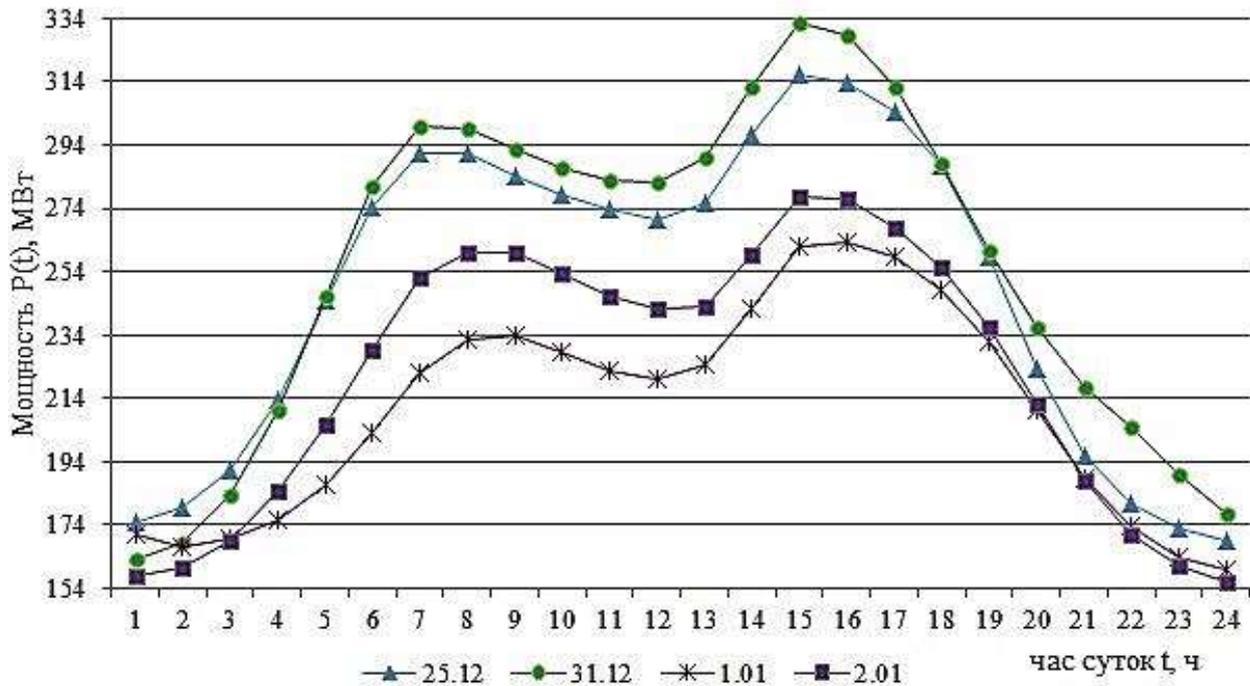


Рис. 3. Суточные графики электропотребления АО «Алтайкрайэнерго» в период с 25 декабря 2016 по 2 января 2017 г.

Fig. 3. Daily power consumption curves of Altaykraienergo JSC for the period from December 25, 2016 to January 2, 2017

При рассмотрении цикла длительностью один год также стоит учитывать, что период праздничных дней характеризуется нетипичной формой суточных графиков электропотребления. Это касается не только государственных, но и религиозных праздников, таких как Рождество, Пасха, Родительский день. На рис. 3 представлены суточные графики электропотребления АО «Алтайкрайэнерго» в период празднования нового 2017 г.

При рассмотрении поведения временного ряда потребления электроэнергии в период праздничных дней можно отметить значительную просадку потребления электроэнергии в праздничные дни (1 и 2 января), по сравнению с обычными сутками (25 декабря), а также рост электрической нагрузки в дневные часы предпраздничных суток (31 декабря). Учет признаков праздничных и предпраздничных дней позволяет избежать значительных отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного в период празднования государственных и религиозных праздников.

4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ ГАРАНТИРУЮЩЕГО ПОСТАВЩИКА

Помимо внутренних тенденций, поведение временного ряда потребления электроэнергии в краткосрочной перспективе определяется группой метеорологических факторов. Погодные условия являются наиболее влиятельными экзогенными переменными при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки [12].

На основании схожих исследований [15] можно сделать вывод, что между временными рядами потребления электроэнергии и температуры воздуха имеется сильная отрицательная корреляционная связь. Уменьшение температуры наружного воздуха вызывает рост электрической нагрузки и наоборот. Однако при увеличении среднесуточной температуры выше комфортных 20°C корреляционная зависимость изменяется с отрицательной на положительную, данное явление связано с

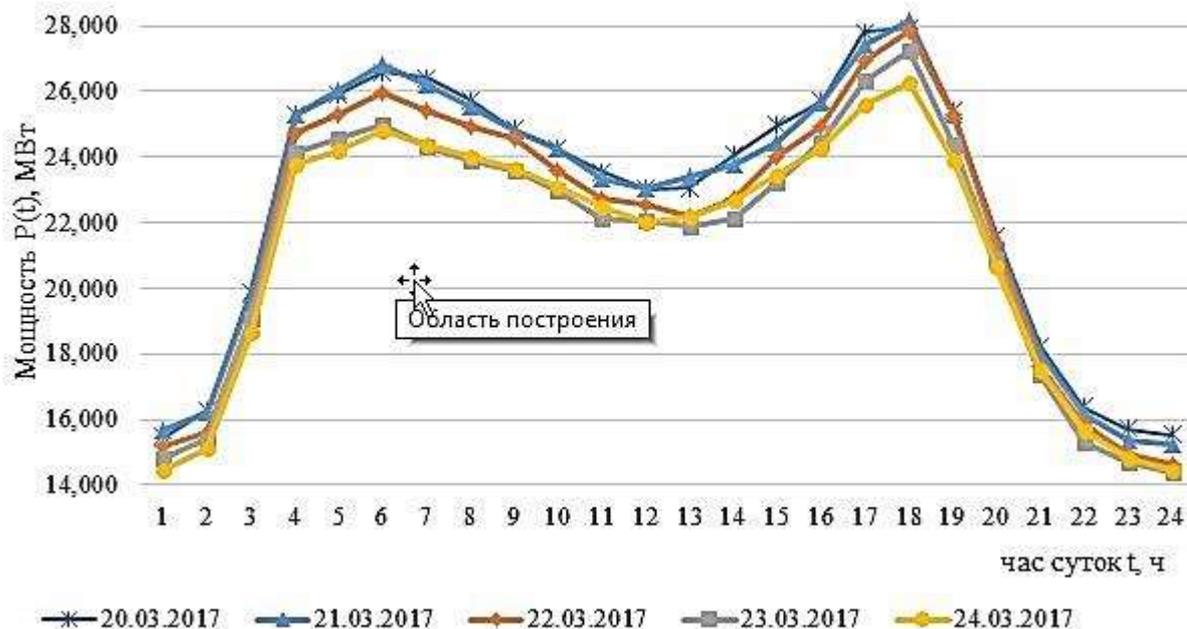


Рис. 4. Суточные графики электрической нагрузки группы точек поставки «Кулундинская» электроэнергетики в период с 20 по 24 марта 2017 г.
 Fig. 4. Daily electric load curves of electric energy delivery point cluster Kulundinskaya for the period from March 20 to March 24, 2017

необходимостью включения «климатического» оборудования в жаркую погоду. На рис. 4 представлены суточные графики электрической нагрузки группы точек поставки «Кулундинская» электроэнергетики в период с 20 по 24 марта 2017 г.

ГТП «Кулундинская» относится к Славгородскому энергоузлу. В период с 20 по 24 марта 2017 г. произошло резкое повышение температуры в городе Славгороде: с $-13,3^{\circ}\text{C}$ 20 марта до -2°C 23 и 24 марта 2017 г. при неизменном состоянии неба. На основании рис. 4 можно сделать вывод, что изменение электропотребления в связи с изменением температуры характеризуется некоторой инерционностью. Несмотря на то, что потепление началось 20 марта 2017 г., просадка потребления электроэнергии начинается только в вечерние часы 21 марта того же года. Очевидно, что даже после стабилизации среднесуточной температуры 23 марта 2017 г. снижение почасовых объемов потребления электроэнергии ГТП продолжается до второй половины суток 24 марта 2017 г. Инерционность изменения поведения временного ряда электрической нагрузки ГТП связана с

тем, что изменение температуры в отапливаемых помещениях запаздывает по отношению к изменениям температуры наружного воздуха. То есть необходимость во включении и отключении «климатических» приборов возникает после изменений температурного режима. Предлагается учитывать данное явление при помощи дисперсии выборки из 24 предыдущих значений температуры:

$$D = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (t_i - \bar{t})^2, \quad (1)$$

где D – выборочная дисперсия последних 24 значений температуры воздуха; температура воздуха в час, i ; \bar{t} – выборочное среднее.

Влияние ветровой нагрузки на электропотребление ГТП невозможно однозначно оценить. В работе [16] говорится, что использование скорости ветра как отдельного фактора при STLF снижает точность прогнозирования. Однако можно утверждать, что ветер влияет на субъективное ощущение человеком температуры



наружного воздуха. Также ветровая температура несколько увеличивает теплотери в отапливаемых помещениях. И чем ниже температура воздуха, тем больше сказывается данный эффект. Одновременный учет величин температуры наружного воздуха и скорости ветра возможно произвести с помощью ветрохолодового индекса, который рассчитывается на основании выражения:

$$T_{WC} = 33 + (0,474 + 0,454\sqrt{v_B} - 0,0454v_B) \cdot (T - 0,33), \quad (2)$$

где T_{WC} – ветрохолодовой индекс; v_B – скорость ветра, м/с; T – температура воздуха, °С.

Использование ветрохолодового индекса при STLF позволяет учесть сразу температуру наружного воздуха и скорость ветра. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить размерность факторного пространства без потери полезной информации, описывающей поведение временного ряда потребления электроэнергии ГТП.

Следующим метеорологическим фактором, влияющим на почасовые объемы потребления электроэнергии ГТП ГП, является естественная освещенность. На рис. 5 представлены СГЭН ГТП «Власиха» за 18 и 19 апреля 2017 г.

Большая часть потребителей ГТП «Власиха» находятся в окрестности г. Алейск. Для наглядности влияния освещенности на электрическую нагрузку ГТП выбраны будние дни с идентичной среднесуточной температурой. 18 апреля 2017 г. в г. Алейск наблюдался ливневый дождь. 19 апреля 2017 г. состояние неба характеризовалось незначительной облачностью в отдельные часы. Электрическая нагрузка ГТП в светлое время суток увеличивалась в среднем на 10,55%. При этом потребление электроэнергии практически не изменялось в темное время суток.

В значительной мере снижение естественной освещенности происходит только при наличии дождевых облаков нижнего яруса. Облака среднего и верхнего ярусов в меньшей мере влияют на освещенность.

Также нельзя утверждать, что уменьшение освещенности неизменно влечет увеличение электропотребления ГТП. В летнее время года снижение освещенности сопровождается уменьшением электрической нагрузки. Особенно это характерно для ГТП, включающих сельскохозяйственных потребителей. Данное обстоятельство объясняется тем, что в дождливую пасмурную погоду отключается часть «климатического» оборудования, отпадает необходимость полива сельскохозяйственных культур.

На основании вышеизложенного, а также в связи с проблематичностью получения статистических данных об естественной освещенности по всем районам из зоны деятельности гарантирующего поставщика, можно сделать вывод о целесообразности применения фактора наличия осадков при STLF.

В процессе анализа влияния группы метеорологических факторов не было выявлено корреляционной зависимости между величинами почасовых объемов потребления электроэнергии ГТП ГП и атмосферного давления, а также влажности воздуха. Данные факторы закоррелированы с другими метеорологическими факторами.

5. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВРЕМЕННОЙ РЯД ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ГАРАНТИРУЮЩЕГО ПОСТАВЩИКА

Не все данные, необходимые для составления прогноза потребления электроэнергии, являются детерминированными (как информация о дне недели, времени года или статистические данные о метеорологических условиях). К стохастическим факторам, которые оказывают влияние на результаты STLF, можно отнести аварийные отключения на электросетевом оборудовании, а также поломки основного оборудования крупных потребителей электроэнергии ГТП ГП. Темой отдельного исследования является прогнозирование аварийных отказов элементов электросетевого

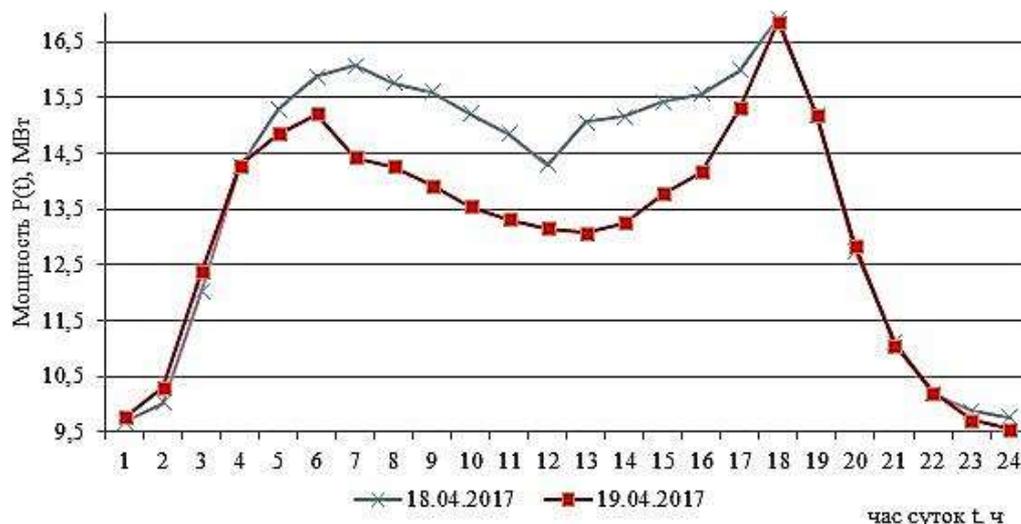


Рис. 5. Суточный график электрической нагрузки групп точек поставки «Власиха» в период с 18 по 19 апреля 2017 г.

Fig. 5. Daily electric load curve of electric energy delivery point cluster Vlasikha for the period from April 18 to April 19, 2017

оборудования с помощью нейросетевых алгоритмов [17]. Перспективным путем повышения точности краткосрочного прогнозирования электропотребления является учет результатов прогноза отказа элементов электросетевого оборудования при составлении STLF.

Однако существуют данные о событиях, которыми приходится оперировать в процессе составления STLF, не являющиеся детерминированными, но в то же время вероятность их возникновения достаточно велика. К ним можно отнести прогноз метеорологических условий, информацию о плановых ремонтных работах на электросетевом оборудовании, а также данные о режиме работы крупных потребителей электроэнергии ГТП ГП. Эти факторы создают дополнительную неопределенность при составлении прогноза. Однако без их учета резко снижается точность STLF.

Как было выяснено ранее, метеорологические условия в значительной степени влияют на поведение временного ряда электропотребления ГТП в краткосрочной перспективе. В то же время при прогнозировании почасовых объемов потребления электроэнергии ГТП на РСВ необходимо как можно точнее знать информацию о метеорологических условиях на следующие сутки. Однако ни один из бесплатных ис-

точников не может располагать высокой точностью прогнозирования. Для снижения неопределенности, связанной с данной ситуацией, необходимо подвергать сравнительному анализу информацию о метеорологических условиях. То есть данные, полученные из одного источника, необходимо сравнить с данными из других источников на предмет совпадения. Только после проверки можно оперировать ими с целью прогноза.

Энергосбытовое предприятие является посредником между электростанциями, занимающимися выработкой электроэнергии и проблемами потребителей [18]. АО «Алтайкрайэнерго» считается гарантирующим поставщиком электроэнергии на части территории Алтайского края. На ОР-ЭМ данный ГП представлен 15 группами точек поставки электроэнергии, которые включают от 2 до 82 фидеров 10–35 кВ. В литературных источниках хорошо освещен вопрос разработки моделей краткосрочного прогнозирования электропотребления крупных объектов, таких как энергосистема субъекта Российской Федерации [1, 14, 18]. При краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки таких крупных объектов можно не учитывать ремонтные работы на сетевом оборудовании ниже 220 кВ, а также режим работы потребителей электро-



энергии с мощностью менее 10 МВт. В то же время отключение на сетевом оборудовании 10–110 кВ в значительной мере сказывается на потреблении электроэнергии ГТП ГП. На рис. 6 представлены суточные графики электропотребления группы точек поставки «Корчинская» электроэнергии при плановых отключениях на электросетевом оборудовании филиала ПАО «МРСК Сибири» – «Алтайэнерго».

26 апреля 2017 г. на подстанциях «Романовская» и «Мамонтовская», входящих в ГТП «Корчинская», проводились плановые работы по чистке изоляции. Из рис. 6 видно, что электропотребление ГТП «Корчинская» во время ремонтных работ уменьшилось в среднем на 69,77%, т.к. отсутствует возможность доставить электроэнергию до части конечных потребителей данной ГТП. Также (после подачи напряжения) наблюдается рост электропотребления на 6%, по сравнению с потреблением электроэнергии 25 апреля 2017 г. Во избежание больших отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного, необходимо учитывать плановые ремонтные работы на электросетевом оборудовании, обеспечивающем транспорт электроэнергии до конечного потребителя ГТП.

Заявки на обслуживание и ремонт электросетевого оборудования предоставляются гарантирующему поставщику в виде

оперативной диспетчерской информации о плановых работах на электросетевом оборудовании. В заявках указываются моменты отключения и включения электросетевого оборудования, наименование объекта, по которому происходит отключение, а также доля потребителей, которых возможно запитать по резервной линии.

При этом нередко ситуации, когда ремонтные работы отменяются по тем или иным причинам, произведены не в полном объеме (отличается количество отключаемых комплектных трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ, время отключения и включения линии), а также заявка на плановые работы (отмену ремонтных работ) не доводится до гарантирующего поставщика вследствие ошибок оперативно-диспетчерского персонала или по техническим причинам. Для учета недопоставки электроэнергии до конечных потребителей (вследствие ремонтных работ) необходимо скорректировать прогнозные почасовые объемы потребления электроэнергии ГТП на объем потребления в точках поставки, питаемых отключаемыми фидерами. Почасовые объемы недопоставки определяются на основании данных автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии, используемой для определения объемов покупки электроэнергии на ОРЭМ.

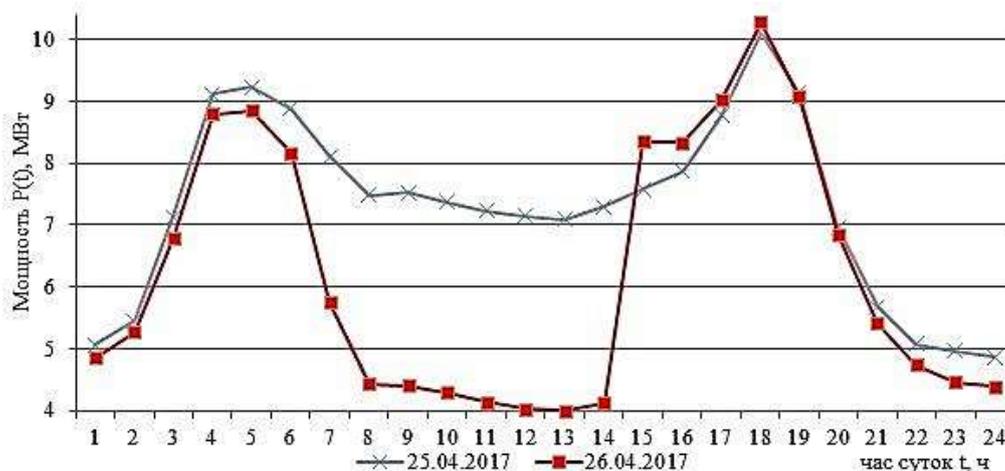


Рис. 6. Суточные графики электропотребления группы точек поставки «Корчинская» при плановых отключениях на электросетевом оборудовании филиала ПАО «МРСК Сибири» – «Алтайэнерго»
Fig. 6. Daily energy consumption curves of electric energy delivery point cluster Korchinskaya at scheduled repairs on electric grid equipment of the branch of IDGC of Siberia – Altaienergo PJSC

При прогнозировании почасовых объемов электропотребления ГТП гарантирующих поставщиков, находящихся в сельской местности, необходимо учитывать режим работы крупных производителей сельскохозяйственных товаров с мощностью свыше 670 кВт. Учет режима работы более мелких потребителей электроэнергии ГТП ГП значительно усложнит архитектуру модели прогнозирования без увеличения точности STLF. На рис. 7 представлены СГЭН ГТП «Власиха» при различных режимах работы ООО «Усть-Калманский элеватор».

Производственный цех предприятия до 4:00 31 августа 2018 г. работал в штатном режиме, после чего началось техническое обслуживание основного оборудования. В связи с этим потребление электроэнергии ГТП «Власиха» в последующие часы суток 31 августа 2018 г. снизилось на 650 кВт (в среднем на 5,74%), по сравнению с почасовым электропотреблением 30 августа 2018 г. при аналогичных уровнях воздействия других факторов. На основании СГЭН, представленных на рис. 7, электрическая нагрузка данного производителя сельскохозяйственных товаров соизмерима с нагрузкой всей ГТП ГП. Отсутствие информации о режиме работы данного предприятия может дать относительную ошибку прогнозирования более 5% без учета влияния других факторов.

На рис. 8 представлен суточный график электрической нагрузки ГТП «Южная» при отключении холодной воды в г. Рубцовск.

При отключенном холодном водоснабжении в воскресенье 19.08.2018 в г. Рубцовск потребление электроэнергии снизилось в среднем на 13,4%, по сравнению с 12 августа 2018 г. при схожих метеорологических условиях. Данный факт объясняется отсутствием возможности у населения заниматься повседневными делами, отключением приводов насосных станций и т.д.

После возобновления водоснабжения электрическая нагрузка возросла на 8,7%. Рост потребления электроэнергии связан с массовым включением бытовых приборов после простоя, поливом сельскохозяйственных культур.

Рассмотренные в данном пункте факторы могут показаться незначительными при анализе суточных графиков энергосистемы региона в целом. Однако они в значительной степени влияют на совокупное электропотребление гарантирующих поставщиков.

В соответствии с Правилами ОРЭМ², разрешающими поставщикам транслировать (т.е. закладывать в цену на электроэнергию) на конечных потребителей только 5% отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного, даже несущественные изменения графиков могут привести к значительным убыткам. Помимо убытков для самих гарантирующих поставщиков, величина отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного влияет на цену электроэнергии для конечных потребителей (в виде стоимостного небаланса «балансирующего рынка» на ОРЭМ, который увеличивается пропорционально величине отклонений). Поэтому учет всех основных факторов приобретает особую важность при краткосрочном прогнозировании электропотребления.

Прогнозирование потребления электроэнергии является сложной задачей, т.к. оно зависит от сложного поведения электрической нагрузки зданий (сооружений) и неопределенности влияющих факторов, что в свою очередь приводит к частым колебаниям спроса на электроэнергию [20]. Таким образом, к основным факторам, оказывающим решающее воздействие на поведение временного ряда электропотребления совокупного спроса потребителей гарантирующего поставщика, в краткосрочной перспективе можно отнести:

²Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности: постановление Правительства Российской Федерации № 1172 от 27.12.2010, изм. 03.02.2020 г.

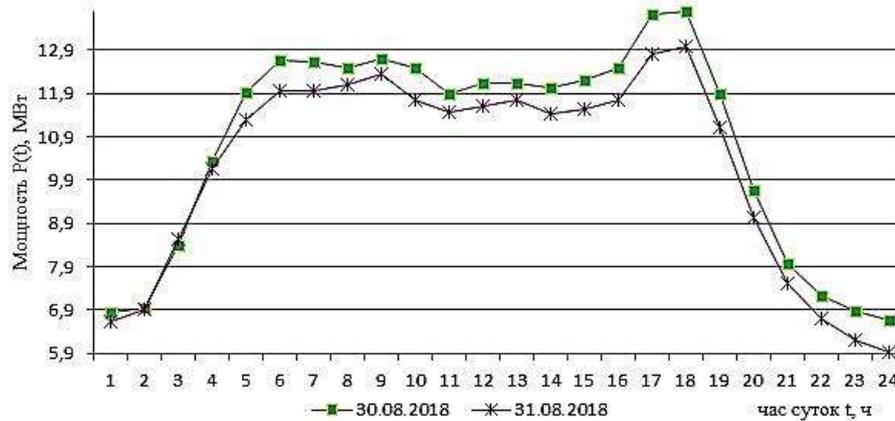


Рис. 7. Суточный график электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии «Власиха» при различных режимах работы ООО «Усть-Калманский элеватор»
Fig. 7. Daily load curve of electrical energy delivery point cluster Vlasikha at various operating modes of Ust-Kalmansky Elevator LLC

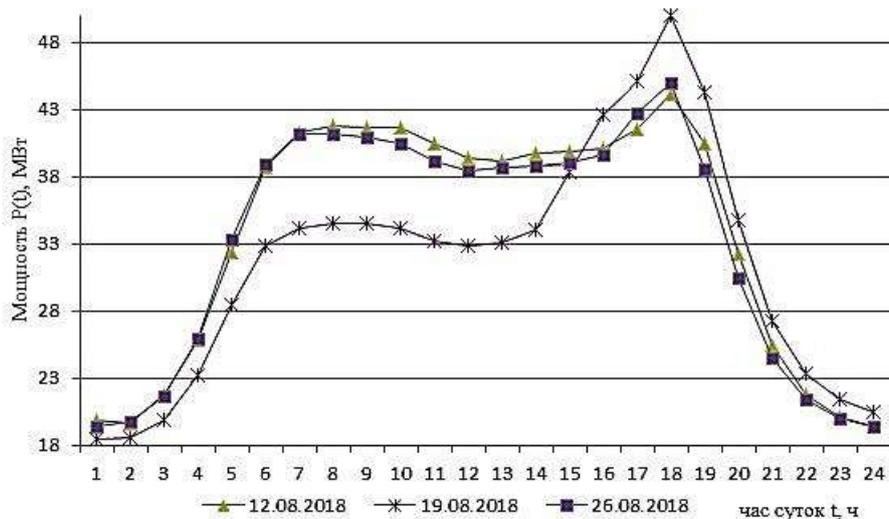


Рис. 8. Суточный график электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии «Южная» при отключении холодного водоснабжения в г. Рубцовск
Fig. 8. Daily load curve of electrical energy delivery point cluster Yuzhnaya under shutdown of cold water supply in Rubtsovsk

- порядковый номер дня в году;
- порядковый номер дня в неделе;
- длину светового дня;
- признак предпраздничного дня;
- признак праздничного дня;
- признак каникул в образовательных учреждениях;
- признак наличия центрального отопления;
- признак наличия горячего водоснабжения;
- признак наличия холодного водоснабжения;

- почасовые значения ветро-холодового индекса, °С;
- дисперсию 24 предыдущих значений температуры наружного воздуха, °С;
- количество осадков, мм;
- режим работы всех потребителей электроэнергии ГТП с мощностью свыше 670 кВт;
- плановые отключения фидеров, питающих потребителей электроэнергии ГТП.

На основании набора факторов формируется выборка, предназначенная

для обучения и тестирования ИНС. Из множества параметров, определяющих электрическую нагрузку, выбираются те, которые могут быть внесены в обучающую выборку, т.е. доступные в открытых источниках или вычисляемые на основании открытой информации [19].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе исследования выяснено, что временной ряд совокупного электропотребления потребителей гарантирующего поставщика характеризуется сезонными и циклическими изменениями различной длительности: сутки, неделя, год. Предпраздничные и праздничные дни имеют нетипичную форму суточного графика потребления электроэнергии.

2. Между потреблением электроэнергии и температурой наружного воздуха имеется сильная корреляционная связь, т.к. изменение температуры в зданиях запаздывает по отношению к изменениям температуры наружного воздуха (имеется некоторая инерционность); на объемы потребления электроэнергии влияет не только величина температуры, но и изменения температурного режима, происходившие в предшествующий период. Предлагается учитывать данное явление при краткосроч-

ном прогнозировании электропотребления с помощью дисперсии выборки из 24 предыдущих значений температуры. Также (в целях снижения размерности факторного пространства) целесообразно учитывать температуру наружного воздуха и скорость ветра с помощью ветрохолодового индекса.

3. Естественная освещенность влияет на объемы электропотребления только в светлое время суток. Стоит отметить, что уменьшение освещенности не всегда приводит к увеличению электрической нагрузки. В летнее время года снижение освещенности вызывает уменьшение электропотребления вследствие отключения части «климатического» оборудования.

4. Выборка статистических данных, необходимая для краткосрочного прогнозирования совокупного электропотребления гарантирующего поставщика, должна учитывать помимо стандартных временных и метеорологических факторов также факторы отключения электро-сетевого оборудования 6–220 кВ, режимы работы крупных потребителей электроэнергии, наличие центрального отопления и холодного (горячего) водоснабжения в отдельных населенных пунктах, которые считаются незначительными для электрической нагрузки энергосистемы.

Библиографический список

1. Доманов В.И., Билалова А.И. Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 2. С. 59–65. <https://doi.org/10.14529/power160208>
2. Gao Gao, Kwoklun Lo, Jianfeng Lu, Fulin Fan. A short-term electricity price forecasting scheme for power market // World Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol. 4. No. 3. P. 58–65. <https://doi.org/10.4236/wjet.2016.43D008>
3. Бояркин Д.А., Крупнев Д.С., Якубовский Д.В. Использование методов машинного обучения при оценке надежности электроэнергетических систем методом Монте-Карло // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2018. Т. 11. № 4. С. 146–153. <https://doi.org/10.14529/mmp180411>
4. López M., Sans C., Valero S., Senabre C. Empirical comparison of neural network and auto-regressive models in short-term load forecasting // Energies. 2018. Vol. 11. No. 8. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/en11082080>
5. Tureczek A., Nielsen P., Madsen H. Electricity Consumption Clustering Using Smart Meter Data // Energies. 2018. Vol. 11. No. 4. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/en11040859>
6. Zheng Huiting, Yuan Jiabin, Chen Long. Short-term load forecasting using EMD-LSTM neural networks with a XGBOOST algorithm for feature importance evaluation // Energies. 2017. Vol. 10. No. 8. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/en10081168>
7. Катаев А.С. Нейронечеткая модель формирования нечетких правил для оценки состояния объектов в условиях неопределенности // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11. № 3. С. 477–492. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2019-11-3-477-492>
8. Третьяк А.Я., Кузнецова А.В., Борисов К.А. Определение поломок резцов pdc с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования // Известия



Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 5. С. 169–177. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/275>

9. Ming-Wei Li, Jing Geng, Wei-Chiang Hong, Yang Zhang. Hybridizing Chaotic and Quantum Mechanisms and Fruit Fly Optimization Algorithm with Least Squares Support Vector Regression Model in Electric Load Forecasting // *Energies*. 2018. Vol. 11. No. 9. P. 2226. <https://doi.org/10.3390/en11092226>

10. Rajan D.V., Mallick S., Thakur S.S. An efficient approach for short-term load forecasting using historical data // *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2012. Vol. 1. Issue 3. P. 1–9.

11. Masood N.A., Ahsan Q. A Methodology for identification of weather sensitive component of electrical load using empirical mode decomposition technique // *Energy and Power Engineering*. 2013. Vol. 5. No. 4. P. 293–300. <https://doi.org/10.4236/epe.2013.54029>

12. Wang Zeyu, Srinivasan R.S. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 75. P. 796–808. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.079>

13. Auder B., Cugliari J., Goude Y., Poggi J.-M. Scalable Clustering of Individual Electrical Curves for Profiling and Bottom-Up Forecasting // *Energies*. 2018. Vol. 11. No. 7. P. 1893. <https://doi.org/10.3390/en11071893>

14. Торопов А.С., Туликов А.Н. Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 5. С. 143–151. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-143-151>

15. Ruzic S., Vuckovic A., Nikolic N. Weather sensitive

method for short term load forecasting in electric power Utility of Serbia // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2003. Vol. 18. No. 4. P. 1581–1586. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.811172>

16. Reynolds J., Ahmad M.W., Rezgui Y., Hippolyte J.-L. Operational supply and demand optimisation of a multi-vector district energy system using artificial neural networks and a genetic algorithm // *Applied Energy*. 2019. Vol. 235. P. 699–713. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.001>

17. Карамов Д.Н., Наумов И.В., Пержабинский С.М. Математическое моделирование отказов элементов электрической сети (10 кВ) автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 7. С. 116–130.

18. Кирпичникова И.М., Саплин Л.А., Соломахо К.Л. Прогнозирование объемов потребления электроэнергии // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2014. Т. 14. № 2. С. 16–21.

19. Иванин О.А., Директор Л.Б. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей // *Теплоэнергетика*. 2018. № 5. С. 17–26. <https://doi.org/10.1134/S0040363618050041>

20. Mocanu E., Nguyen Phuong H., Gibescu M., Kling W.L. Deep learning for estimating building energy consumption // *Sustainable Energy. Grids and Networks*. 2016. Vol. 6. P. 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.02.005>

21. Надтока И.И., Хусейн А.-З.Б.М. Краткосрочное прогнозирование электропотребления региона с учетом метеофакторов на основе метода опорных векторов и алгоритма роя частиц // *Известия вузов. Электромеханика*. 2014. № 3. С. 44–47.

References

1. Domanov VI, Bilalova AI. Forecasting power consumption based on source information. *Vestnik yuzhnoural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* = Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering. 2016;16(2):59–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power160208>

2. Gao Gao, Kwoklun Lo, Jianfeng Lu, Fulin Fan. A short-term electricity price forecasting scheme for power market. *World Journal of Engineering and Technology*. 2016;4(3):58–65. <https://doi.org/10.4236/wjet.2016.43D008>

3. Boiarkin DA, Krupenev DS, Iakubovskii DV. Machine learning in electric power systems adequacy assessment using Monte Carlo method. *Vestnik yuzhnoural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling. Programming & Computer Software. 2018;11(4):146–153. (In Russ.)

4. López M, Sans C, Valero S, Senabre C. Empirical comparison of neural network and auto-regressive

models in short-term load forecasting. *Energies*. 2018;11(8):1–19. <https://doi.org/10.3390/en11082080>

5. Tureczek A, Nielsen P, Madsen H. Electricity Consumption Clustering Using Smart Meter Data. *Energies*. 2018;11(4):1–18. <https://doi.org/10.3390/en11040859>

6. Zheng Huiting, Yuan Jiabin, Chen Long. Short-term load forecasting using EMD-LSTM neural networks with a XGBOOST algorithm for feature importance evaluation. *Energies*. 2017;10(8):1–20. <https://doi.org/10.3390/en10081168>

7. Katasev AS. Neuro-fuzzy model of fuzzy rules formation for objects state evaluation in conditions of uncertainty. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye* = Computer Research and Modeling. 2019;11(3):477–492. (In Russ.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2019-11-3-477-492>

8. Tret'iak AI, Kuznetsova AV, Borisov KA. Determination of PDC cutter breakdowns using regression and neural network modeling. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo

Assets Engineering. 2019;330(5):169–177. (In Russ.)
<https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/275>

9. Ming-Wei Li, Jing Geng, Wei-Chiang Hong, Yang Zhang. Hybridizing Chaotic and Quantum Mechanisms and Fruit Fly Optimization Algorithm with Least Squares Support Vector Regression Model in Electric Load Forecasting. *Energies*. 2018;11(9):2226.
<https://doi.org/10.3390/en11092226>

10. Rajan DV, Mallick S, Thakur SS. An efficient approach for short-term load forecasting using historical data. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2012;1(3):1–9.

11. Masood NA, Ahsan Q. A Methodology for identification of weather sensitive component of electrical load using empirical mode decomposition technique. *Energy and Power Engineering*. 2013;5(4):293–300.
<https://doi.org/10.4236/epe.2013.54029>

12. Wang Zeyu, Srinivasan RS. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;75:796–808.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.079>

13. Auder B, Cugliari J, Goude Y, Poggi J-M. Scalable Clustering of Individual Electrical Curves for Profiling and Bottom-Up Forecasting. *Energies*. 2018;11(7):1893. <https://doi.org/10.3390/en11071893>

14. Toropov AS, Tulikov AN. Forecasting of regional power supply system power consumption per hour using artificial neural networks. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(5):143–151. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-143-151>

15. Ruzic S, Vuckovic A, Nikolic N. Weather sensitive method for short term load forecasting in electric power Utility of Serbia. *IEEE Transactions on Power Systems*.

Критерии авторства

Серебряков Н.А. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Серебряков Николай Александрович,
аспирант,
Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, Россия;
✉ e-mail: na_serebryakov@altke.ru

2003;18(4):1581–1586.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.811172>

Authorship criteria

Serebryakov N.A. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikolay A. Serebryakov,
Postgraduate Student,
Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin pr., Barnaul 656038, Russia;
✉ e-mail: na_serebryakov@altke.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.316.1.05

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-382-395>

Децентрализованная реконфигурация электрической сети с Microgrid с использованием реклоузеров

© А.Г. Фишов*, А.Х. Гуломзода*, Л.С. Касобов**

*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

**Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан

Резюме: Целью работы является исследование возможностей повышения надежности электроснабжения отдаленных потребителей в электрических сетях с распределенной малой генерацией путем применения реклоузеров и соответствующего управления. В распределительных электрических сетях растет доля малой генерации на базе возобновляемых источников энергии в локальных районах с собственными потребителями, при этом потребители, находящиеся в отдаленных районах, преимущественно сельских, все еще страдают от поставляемой им некачественной электроэнергии и низкой надежности электроснабжения, хотя, в случае потери основного источника, электроснабжение всех или части потребителей в таких районах может осуществляться от имеющейся в них малой генерации. Отсутствие надлежащей технологии управления сетью с распределенной малой генерацией при потере основного источника не позволяет полноценно использовать эту возможность обеспечения надежного электроснабжения потребителей в таких районах. Предлагается и исследуется способ децентрализованного управления отделением районов сети с собственной генерацией при потере основного источника электроснабжения с последующим восстановлением нормальной схемы и режима на реклоузерах электрической сети. Такие районы приобретают свойства Microgrid, способной работать как автономно, так и параллельно с внешней сетью. Деление и восстановление целостности происходит в автоматических пунктах секционирования с реклоузерами, при этом восстановление целостности сети с параллельной работой источников нуждается в проведении синхронизации частей на удаленных от источников реклоузерах. Для решения данной задачи предлагается добавление синхронизатора в шкаф управления реклоузера.

Ключевые слова: малая гидрогенерация, децентрализованное управление, Microgrid, режимная и противоаварийная автоматика, автоматический пункт секционирования, реклоузер

Информация о статье: Дата поступления 17 октября 2019 г.; дата принятия к печати 12 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Фишов А.Г., Гуломзода А.Х., Касобов Л.С. Децентрализованная реконфигурация электрической сети с Microgrid с использованием реклоузеров. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 382–395. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-382-395>

Decentralised reconfiguration of a Microgrid electrical network using reclosers

Alexander G. Fishov*, Anvari Kh. Ghulomzoda*, Loik S. Kasobov**

*Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia

**Tajik technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

Abstract: The present study is aimed at investigating possibilities for increasing the reliability of power supply to remote consumers via electric networks having distributed power generation sources by means of automatic circuit reclosers (ACRs) and appropriate management systems. At the present time, the number of small electrical networks based on renewable energy generation sources in local areas is growing. Although consumers located in remote rural areas continue to suffer from low power supply reliability, in case of loss of the main source, all or part of the consumer base in such areas can be supplied with electricity from available small power generation sources. However, the assurance of reliable power supply to consumers in remote areas is hampered by a lack of appropriate technological solutions for managing such networks when the main power source fails. A decentralised method for controlling a network with autonomous power generation in case of loss of main power source supply, allowing the subsequent restoration of normal circuit and mode for a recloser electric network, is proposed and studied. Such networks acquire the properties of a Microgrid, capable of working both autonomously and in parallel with an external network. Division and restoration of integrity occurs at automatic sectioning points using reclosers, while the restoration of the integrity of the network with parallel

operation of sources requires synchronisation of components at reclosers remote from sources. As a solution, the addition of a synchroniser at the recloser control cabinet is proposed.

Keywords: small-scale hydrogeneration, decentralized control, Microgrid, operating and automatic emergency response system, automatic unit for sectionalizing, recloser

Information about the article: Received October 17, 2019; accepted for publication February 12, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Fishov AG, Ghulomzoda AKh, Kasobov LS. Decentralised reconfiguration of a Microgrid electrical network using reclosers. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):382–395. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-382-395>

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует немало технологий, обеспечивающих качественное и надежное электроснабжение потребителей от локальных источников энергии, имеющих возможность в аварийных режимах получить питание от резервных источников. При этом электроснабжение потребителей, находящихся в отдаленных сельских районах, на сегодняшний день является весьма сложной задачей для электросетевых компаний.

С такими трудностями сталкивается и электроэнергетическая система Таджикистана, где электроснабжение потребителей производится централизованно, а в осенне-зимний период появляется значительный дефицит электроэнергии, вынуждающий вводить ограничения в ее доступе, что особенно сильно отражается на сельском населении, составляющем около 70% населения страны.

В стране имеется огромный запас гидроресурсов, по данному показателю Таджикистан стоит на первом месте среди стран Центральной Азии и на восьмом – в мире. Страна обладает 4% всего мирового гидроэнергетического потенциала. Общий гидроэнергетический потенциал страны превышает 527 млрд кВт·ч в год. Потенциальные запасы малой гидроэнергетики составляют 184,46 млрд кВт·ч в год [1, 2]. К малой генерации в стране относят малые электростанции мощностью 10–10000 кВт. В период с 1990 по 2013 г. на территории страны было построено и сдано в эксплуатацию множество малых гидроэлектростанций (МГЭС) различной мощности [3],

динамика строительства которых приведена на рис. 1.

В развитии малой гидрогенерации в стране огромное значение имеет проект «CASA-1000» [4], разработанный и согласованный в 2011 г. между правительствами 4 стран (Таджикистан, Киргизия, Афганистан и Пакистан), предусматривающий экспорт избыточной электроэнергии, появляющейся в летний период, в соседние страны. В производстве электроэнергии равноправно будут участвовать не только крупные ГЭС, но и МГЭС. Реализация вышеуказанного проекта позволит эффективно использовать МГЭС и развивать данную область энергетики в стране.

Необходимым условием для этого является интеграция МГЭС в существующие электрические сети, объединение нескольких локальных систем энергоснабжения (ЛСЭ) на базе МГЭС в изолированные (островные) или связанные с общей электрической сетью (полуостровные) локальные энергосистемы. Кроме того, автономная работа МГЭС имеет известные недостатки. К ним относят низкие надежность электроснабжения и качество электроэнергии. Эти недостатки в значительной мере устраняются при синхронной параллельной работе ЛСЭ с внешней энергосистемой. Положительные эффекты в виде снижения потерь, возможности подключения дополнительных потребителей за счет разгрузки сети, а также повышения качества электроэнергии (по напряжению) в районе присоединения малой генерации получает и сама внешняя электрическая сеть, к которой присоединяется ЛСЭ.

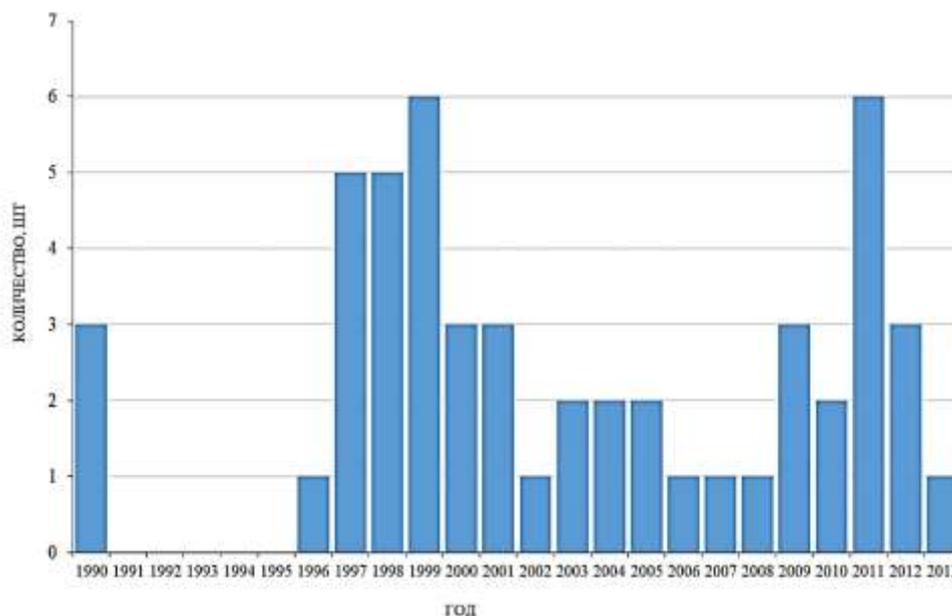


Рис. 1. Динамика строительства малых гидроэлектростанций в Таджикистане в период с 1990 по 2013 г.

Fig. 1. Construction dynamics of small hydroelectric power stations in the Republic of Tajikistan in the period from 1990 to 2013

Таким образом, для решения вышеуказанных задач необходима специальная технология управления режимами ЛЭС, работающих параллельно с внешними электрическими сетями.

2. СМЕНА КОНЦЕПЦИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время актуальным является переход от централизованной к децентрализованной системе электроснабжения отдаленных потребителей, позволяющей использовать распределенные по электрической сети источники электроэнергии, в т.ч. возобновляемые, называемые распределенной генерацией [5, 6].

С развитием силовой электроники и теории управления возникла концепция Microgrid, которая отражена в исследовательских работах, проведенных в США, Европе и Азии [7–9]. Microgrid – это небольшая независимая система, которая объединяет малую генерацию (МГ), потребителей, устройства накопления энергии, а также устройства управления, образуя целостную управляемую систему энерго-

снабжения. На рис. 2 показана базовая структура гибридной Microgrid.

Microgrid может иметь как автономный, так и параллельный с внешней сетью режим работы, в котором обменная мощность может носить реверсивный характер. В аварийной ситуации Microgrid может самостоятельно отделяться от внешней сети и переходить в автономный режим. После устранения аварии Microgrid может снова перейти в режим параллельной работы с внешней сетью. Таким образом, Microgrid является интеллектуальной автоматизированной системой, которая самостоятельно реконфигурируется, управляет балансом и распределяет потоки мощности.

В работе предлагается решение задачи присоединения Microgrid на базе малой генерации к внешней электрической сети за счет ее прямого включения в сеть посредством синхронных связей или создания Microgrid в существующей сети без централизации управления на концепции мультиагентных систем. Необходимая для этого автоматика является режимно-противоаварийной с автооператором [10]. Данная автоматика применима как на планируемых объектах с малой генерацией,

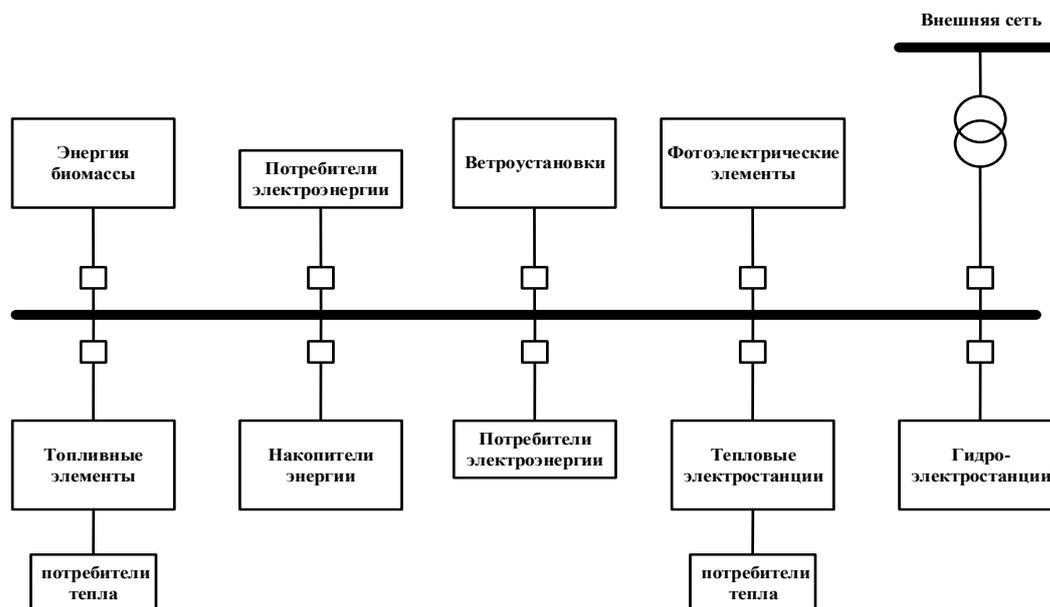


Рис. 2. Базовая структура гибридной Microgrid
 Fig. 2. Basic structure of a hybrid Microgrid

так и на уже существующих объектах, работа которых в таких режимах исходно не предполагалась.

Для обеспечения безопасной параллельной работы Microgrid в автоматике предложен и реализован специальный способ режимно-противоаварийного управления [11]. Идея способа – опережающее сбалансированное отделение Microgrid по заранее известным фиксированным сечениям сети при нарушениях нормального режима с переходом в автономный режим работы с последующим автоматическим восстановлением синхронизма и нормального режима с требуемой нагрузкой оборудования.

3. РАСПРЕДЕЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С MICROGRID С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РЕКЛОУЗЕРОВ

Распределительные сети 0,4–6–10 кВ системы сельского электроснабжения характеризуются большой протяженностью линий и разветвленностью. К основным не-

достаткам таких сетей можно отнести низкую надежность, невысокое качество поставляемой электроэнергии и значительные потери. В этих сетях аварийные отключения линий, а именно отключения воздушных линий 0,4 и 10 кВ, могут составлять 40–90% от общего количества аварийных отключений [12]. Надежность электроснабжения в распределительных сельских сетях ухудшается также в связи с их значительным износом. Например, в сетях напряжением 6–20 кВ происходит в среднем 30 отключений в год на 100 км длины линии, а в сетях напряжением 0,4 кВ – до 100 отключений в год на 100 км¹ [13].

Сократить число аварийных отключений потребителей можно путем применения автоматического повторного включения (АПВ) в линиях электропередачи (ЛЭП). Как показывают исследования, около 60% повреждений ЛЭП оказываются неустойчивыми и устраняются АПВ [14]. Однако, т.к. сельские распределительные сети в основном построены в 1960–1970 гг., в распределительных пунктах, где стоят в основном маломасляные выключатели старых типов, физически невозможно применение АПВ.

¹Положение ОАО «РОССЕТИ» о единой технической политике в электросетевом комплексе. Введ. протоколом № 208 Совета директоров ОАО «ФСК ЕЭС» от 27.12.2013. М., 2013.



Известно, что защитные органы распределительных сетей находятся на подстанциях и в распределительных пунктах. При возникновении аварийных ситуаций срабатывает соответствующая защита, дается команда на отключение выключателя фидера, и все потребители фидера остаются без питания, а иногда – на длительное время. Для нахождения места повреждения и его локализации на отходящие линии фидера выезжает оперативная бригада. Путем последовательных переключений разъединителей вдоль фидера и ручного повторного включения выключателя дежурным персоналом подстанции по соответствующей команде диспетчера определяется и отделяется поврежденная часть сети (рис. 3). Такая схема восстановления питания потребителей требует значительного времени, привлечения большого количества персонала и техники.

Значительную часть аварийных отключений и перерывов в потреблении можно сократить, и тем самым повысить надежность электроснабжения. Одним из наиболее эффективных способов является применение пунктов секционирования с разделением фидера коммутационными аппаратами на части. Традиционные пункты секционирования выполнялись на базе ячеек комплектных распределительных устройств наружной установки. В этих ячейках монтировались необходимые токовые защиты, тем самым защищая ЛЭП от

токов короткого замыкания, однако никакой автоматики (например, АПВ) не применялось ввиду различных причин.

С развитием техники и технологии на базе автоматических пунктов секционирования (АПС) удастся значительно повысить надежность электроснабжения потребителей, особенно в сельской местности. Такую возможность дает применение реклоузеров.

Реклоузеры – это элементы, выполняющие функции разделения, резервирования частей электрических сетей 6–10 кВ, имеющих длинные ЛЭП магистрально-радиальной конфигурации. Реклоузер (рис. 4) объединяет в себя вакуумный выключатель, систему преобразователей тока и напряжения, автономную систему оперативного питания, микропроцессорную релейную защиту и автоматику, систему портов для подключения устройств телемеханики, комплекс программного обеспечения [15].

Современные реклоузеры выполняют следующие функции [16]: автоматическое отключение поврежденных участков линии; автоматическое повторное включение; автоматический ввод резервного питания (АВР); оперативные местную и дистанционную реконфигурации сети; самодиагностику; измерение параметров режимов сети; ведение журналов оперативных и аварийных событий в линии; дистанционное управление.

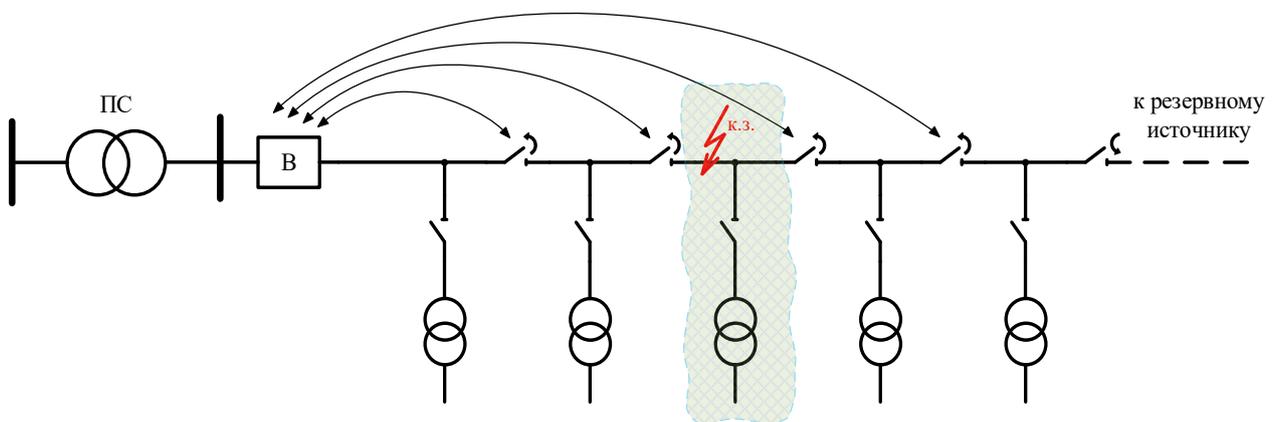


Рис. 3. Восстановление электроснабжения потребителей по классической схеме
Fig. 3. Restoration of consumer power supply according to the classical scheme



Рис. 4. Общий вид реклоузера (высоковольтный вакуумный выключатель со шкафом управления)
Fig. 4. General view of a recloser (high-voltage vacuum circuit breaker with a control cabinet)

Микропроцессорная релейная защита и автоматика современных реклоузеров выполняют такие функции как [17] токовая отсечка, направленная и ненаправленная защита максимального тока, направленная защита от замыканий на землю, защита минимального напряжения, защита максимального напряжения, автоматическое повторное включение (4-кратное), автоматическая частотная разгрузка, восстановление нормального режима, дистанционная защита, защита от обрыва фаз, измерение электрических характеристик, защита от однофазных замыканий на землю, определение места повреждения, частотное автоматическое повторное включение.

Основными производителями реклоузеров в мире на сегодняшний день являются компании «Cooper Power Systems» (США), «Таврида Электрик» (Россия), «NuLec Industries» (Австралия), «Wipac & Bourn» (Англия) и др.

Внедрение реклоузеров в распределительные сети приводит к децентрализации управления аварийными режимами, обеспечивает независимость работы АПС от внешнего управления, минимизацию человеческого фактора, быстрое восстановление питания в неповрежденных участках

сети и, соответственно, минимизирует недоотпуск электроэнергии потребителям [18, 19].

Примеры использования реклоузеров приведены ниже. В протяженных магистральных ЛЭП, где питание осуществляется с одной стороны (отсутствие резервного источника), при возникновении короткого замыкания (КЗ) отключается реклоузер Р2, прежде чем отключится головной выключатель В (рис. 5). В этом случае потребители в неповрежденных участках сети продолжают нормально функционировать. В схемах, где имеется второй источник для резервирования, дополнительно устанавливается реклоузер в качестве пункта АВР (рис. 6). При возникновении КЗ отключаются реклоузеры Р1, Р2, локализуя место повреждения, и срабатывает реклоузер в роли АВР, подавая питание остальным потребителям.

Нужно отметить, что реклоузеры могут применяться не только в проектируемых районных электрических сетях, но и в существующих, что снижает затраты на реконструкцию и сохраняет пригодность физически изношенных сетей, строившихся в далеких 1960-х годах.

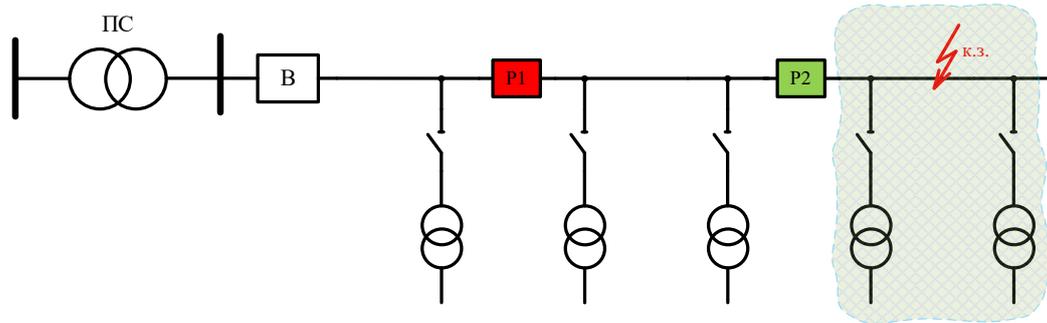


Рис. 5. Схема установки реклоузеров при одностороннем питании
Fig. 5. Recloser installation diagram with single side power supply

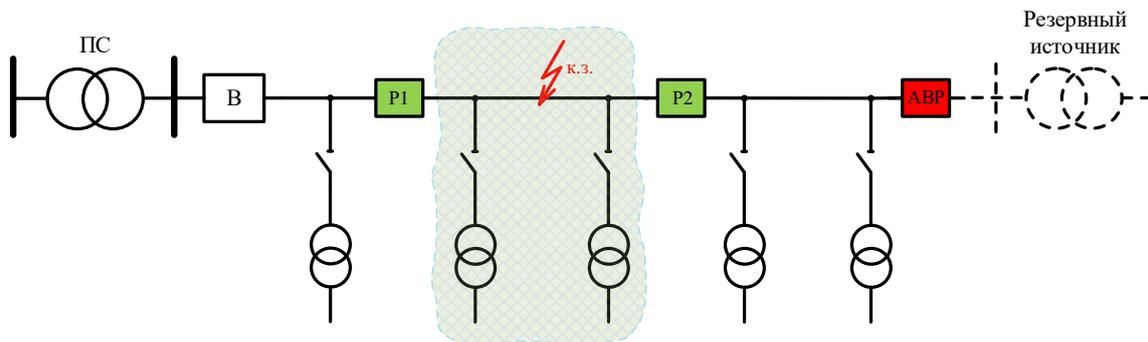


Рис. 6. Схема установки реклоузеров при двустороннем питании сети
Fig. 6. Recloser installation diagram with duplicate power supply

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКЛОУЗЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В MICROGRID

Общеизвестно, что в сетях, где есть генерирующие устройства (МГ в нашем случае), запрещается повторное включение линий, связывающих Microgrid с внешней электрической сетью. При каждом включении таких линий необходимо выполнить условия синхронизации. При несоблюдении этого правила при несинхронном включении генерирующих устройств возникают значительные динамические моменты, что может представлять угрозу повреждения генераторов и их первичных двигателей [20]. Это необходимо учитывать при установке реклоузеров в сетях с генерирующими устройствами. Возможность использования реклоузеров для восстановления параллельной работы источников необходимо исследовать.

Современные реклоузеры не имеют синхронизирующей функциональности, необходимой при их работе в сетях с наличием МГ. Так как реклоузеры устанавливаются удаленно от генераторов, предлагается производить синхронизацию на них, а не на генераторных выключателях. Для этого предлагается усовершенствование функциональности реклоузеров путем добавления блока синхронизации в их шкаф управления вакуумным выключателем (рис. 7).

В качестве синхронизатора предлагается использовать современные микропроцессорные устройства синхронизации типов AC-M, Спринт-М и SYNCHROACT² [20, 22]. Перечисленные устройства обеспечивают выполнение всех условий точной синхронизации источников. Они реализуют функции измерения, анализа и (при необходимости) подгонки параметров для синхронизации. Подгонка электрических параметров производится системой телемеха-

²Беляев Н.А. Синтез систем адаптивной синхронизации генераторов с электрической сетью на основе методов автоматического управления с эталонной моделью: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Томск, 2015. 170 с.



Рис. 7. Шкаф управления вакуумным выключателем с добавлением синхронизатора
Fig. 7. Control cabinet of the vacuum circuit breaker with added synchronizer

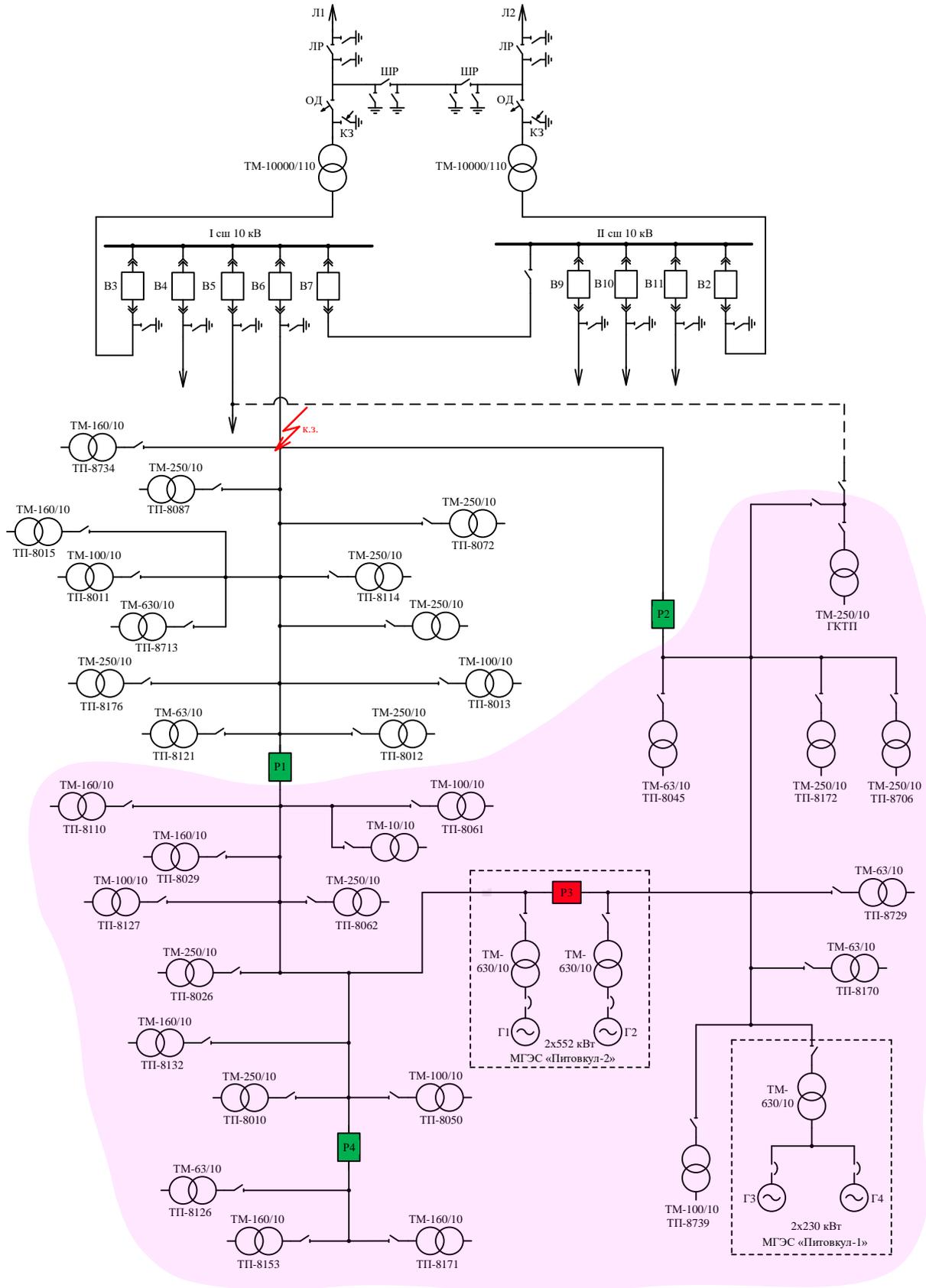
ники с использованием различных каналов связи (GSM, радио, опτικο-волоконные линии связи) с выдачей сигналов автоматическим регуляторам скорости и возбуждения генераторов. При выполнении всех условий синхронизма устройство синхронизации формирует команду на включение выключателя реклоузера. Также необходимо отметить, что устройства синхронизации имеют возможность проведения самодиагностики и вывода информации на дисплее о состоянии синхронизатора, что является безусловным достоинством рассматриваемых устройств.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО СПОСОБА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ АКТИВНОЙ СЕТИ

Моделирование выполнено для одной из схем электроснабжения сельской местности Лахшского района Таджикистана. В схеме ЛЭС данной местности присутствуют две МГЭС. Электроснабжение потребителей производится в островном режиме или в режиме питания от внешней сети на напряжении 10 кВ. Такой режим

электроснабжения обусловлен тем, что во внешней сети происходят частые возмущения, а в случае параллельной работы МГЭС с внешней сетью синхронная работа генераторов часто нарушается, что приводит к обесточиванию потребителей целого фидера. Учитывая высокую аварийность в схеме, приводящей к большому количеству отключений, длительному простое и недоотпуску электроэнергии потребителям, предлагается установка реклоузеров в разных местах этого фидера (рис. 8).

Места установки реклоузеров на схеме рис. 8 выбираются исходя из условия баланса мощностей генерирующих устройств обеих МГЭС и нагрузок потребителей. Такая расстановка позволяет Microgrid автоматически быстро отделяться от внешней сети в аварийных режимах. В качестве противоаварийной автоматики, выполняющей такую функцию, предлагается автоматика опережающего сбалансированного деления (АОСД) [10], [11]. В этом случае генераторы станций не будут выпадать в асинхронный режим, сохраняя устойчивую работу со сбалансированной нагрузкой в островном режиме.

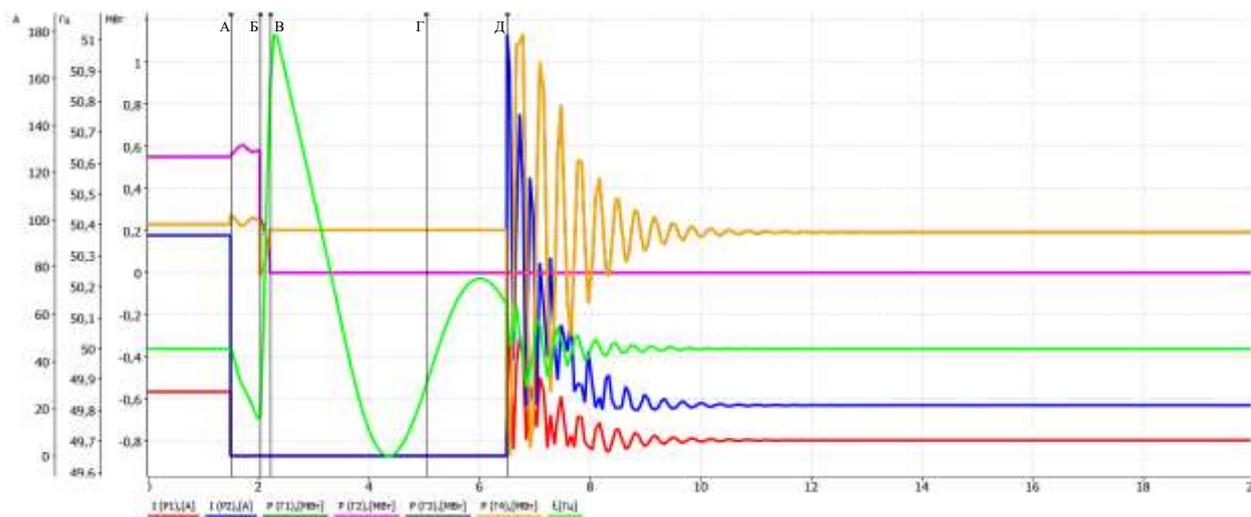


**Рис. 8. Моделируемая схема электроснабжения сельской местности
Лакшского района Раштских электрических сетей Таджикистана**
**Fig. 8. Simulated power supply scheme of the rural Lakhsh district
of Rasht electric networks in Tajikistan**

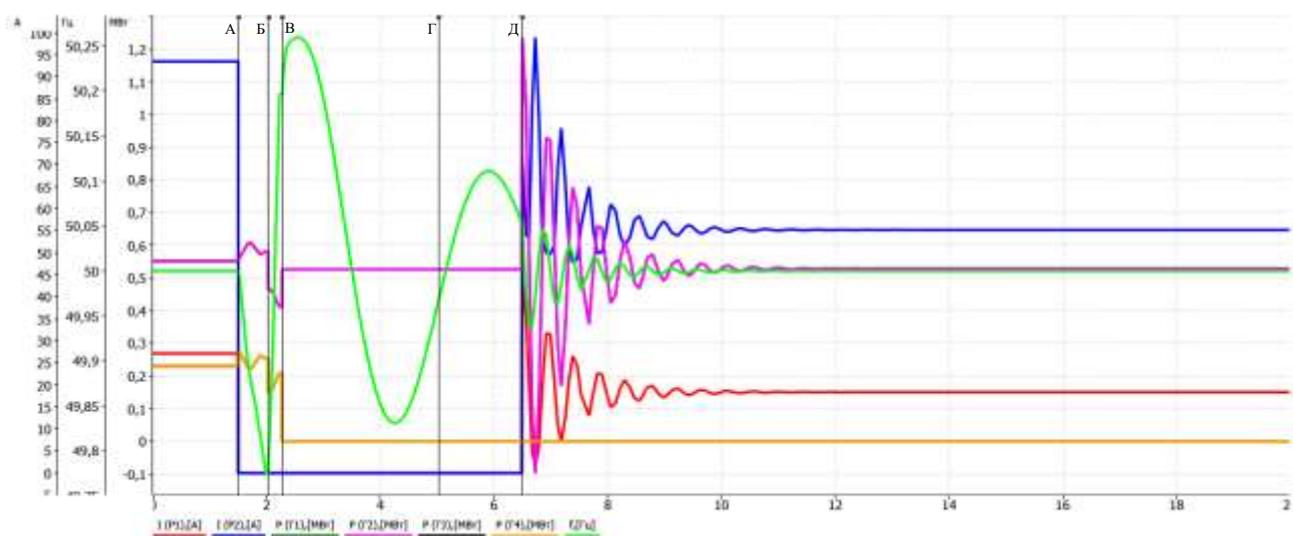
В схеме устанавливаются 4 реклоузера, 2 из которых (P1, P2) предназначены для отделения Microgrid от внешней сети (выделенная область схемы рис. 8) и ее включения на параллельную работу с сетью с выполнением условий синхронизации. Реклоузер P3 предназначен для объединения (включено) двух частей Microgrid при островном режиме и исключения шунтирования схемы (отключено) при ее параллельной работе с сетью, а реклоузер P4 – для выполнения автоматической частотной разгрузки (АЧР).

Моделирование выполнялась в ПВК Rustab базы RastrWin3. Результаты моделирования и осциллограммы переходного процесса при вариации нагрузки Microgrid представлены на рис. 9–11.

На рис. 9–11 представлены изменения токов через реклоузеры P1, P2 – $I(P1)$, $I(P2)$, А; мощность генераторов Г1-Г4 – $P(Г1)$, $P(Г2)$, $P(Г3)$, $P(Г4)$, МВт; частоту в Microgrid – f , Гц; вертикальные полосы, обозначенные буквами А-Д являются указателями действия. При моделировании использовалась противоаварийная АОСД,



**Рис. 9. Переходный процесс в сети с Microgrid с 20% нагрузкой
 Fig. 9. Transient in an electrical network with Microgrid with 20% load**



**Рис. 10. Переходный процесс в сети с Microgrid с 60% нагрузкой
 Fig. 10. Transient in an electrical network with Microgrid with 60% load**

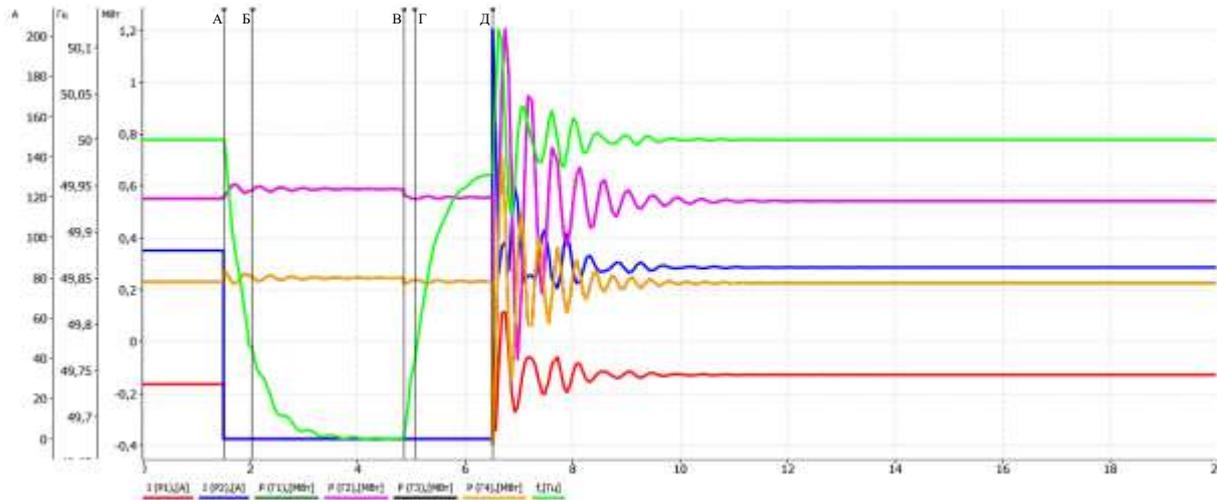


Рис. 11. Переходный процесс в сети с Microgrid с 100% нагрузкой
Fig. 11. Transient in an electrical network with Microgrid with 100% load

действующая по определенным алгоритмам на отключение генераторов при вариации доли нагрузки Microgrid. Сценарии моделирования: при возникновении КЗ (см. рис. 8), опережая срабатывание токовых защит, АОСД распределенно действует на отключение реклоузеров P1, P2 с последующим включением реклоузера P3 (точка А, при $t = 1,5$ с, см. рис. 9–11) и отключением генераторов (точка В, при $t = 2,27$ с; Г1, Г2 на рис. 9 и Г3, Г4 на рис. 10), устраняющих избыточную мощность в отделяемой Microgrid, а в случае дефицита мощности в Microgrid срабатывает АЧР и отключает выключатель реклоузера P4 (точка В при $t = 4,85$ с на рис. 11); срабатывает традиционная защита МТЗ (точка Б при $t = 2$ с на рис. 9–11) и отключает головной выключатель В6; происходит самоустранение КЗ и срабатывает АПВ выключателя В6 (точка Г при $t = 5$ с на рис. 9–11); с появлением напряжения с двух сторон на выключателях реклоузеров P1, P2 запускаются их АПВ с автоматическим повторным включением с

ожиданием синхронизма, и при выполнении условий синхронизации автоматически включаются реклоузеры P1, P2, отключается реклоузер P3 (точка Д при $t = 6,5$ с на см. рис. 9–11). Нормальная работа схемы электроснабжения потребителей восстанавливается. Нарушений электроснабжения потребителей при вариации нагрузки в частях сети с МГ не происходит за счет сохранения в работе генерации.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и исследован способ распределенной синхронизации при подключении Microgrid на параллельную работу с внешней сетью. Способ предполагает использование усовершенствованных реклоузеров. Результаты моделирования подтверждают полезность предложенного способа, обеспечивающего повышение качества поставляемой электроэнергии и надежности электроснабжения отдаленных потребителей.

Библиографический список

1. Фишов А.Г., Гуломзода А.Х., Касобов Л.С. Анализ состояния и направление развития малой гидроэнергетики Таджикистана // Политехнический Вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 1. С. 13–20.
2. Таджикистан. Экспресс-оценка и анализ пробелов [Электронный ресурс]. URL: www.book.lib-i.ru/25selskohozaistvo/685622-1-tadjikistan-

ekspress-ocenka-analiz-probelov-kratkoe-rezyume-energetika-zanimaet-tadjikistane-oso.php (28.09.2019).

3. Gulomzoda A., Nikroshkina S.V. Development of small-scale hydropower generation in Tajikistan // Progress through Innovations: тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов (г. Новосибирск, 28 марта 2019 г.). Новосибирск: Изд-во НГТУ,

2019. С. 123–126.

4. CASA-1000 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.casa-1000.org/indexr.php> (08.01.2019).

5. Gulomzoda A., Fishov A.G., Nikroshkina S.V. Technology of Managing the Modes of Local Energy Supply Systems // Science. Research. Practice: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и магистрантов (г. Новосибирск, 20 декабря 2018 г.). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. С. 70–72.

6. Исмоилов С.Т., Гуломзода А.Х., Рахимов Ф.М. Ввод распределенной генерации в сеть для предоставления системных услуг // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы XI Междунар. конф. (г. Тула, 5–6 ноября 2015 г.). Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 362–367.

7. Xuesong Zhou, Tie Guo, Youjie Ma. An overview on Microgrid technology // International Conference on Mechatronics and Automation (Beijing, 2–5 August 2015). Beijing: IEEE, 2015. P. 76–81. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2015.7237460>

8. Barnes M., Kondoh J., Asano H., Oyarzabal J., Ventakaramanan G., Lasseter R. et al. Real-World Microgrids-An Overview // International Conference on System of Systems Engineering (San Antonio, 16–18 April 2007). San Antonio: IEEE, 2007. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4304255> (28.09.2019). <https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2007.4304255>

9. Zaidi A.A., Kupzog F. Microgrid automation – A self-configuring approach // International Multitopic Conference (Karachi, 23–24 December 2008). Karachi: IEEE, 2008. P. 565–570. <https://doi.org/10.1109/INMIC.2008.4777802>

10. Гежа Е.Н., Глазырин В.Е., Глазырин Г.В., Ивкин Е.С., Марченко А.И., Семендяев Р.Ю. [и др.]. Системная автоматика для интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети // Релейщик. 2018. № 2. С. 24–31.

11. Пат. № 2662728 С2, Российская Федерация, Н02J 3/46. Способ противоаварийного управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях / А.Г. Фишов, Б.Б. Мукатов, А.И. Марченко; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический

университет. Заявл. 06.12.2016; опубл. 30.07.2018.

12. Будзко И.А., Лещинская Т.Б., Сукманов В.И. Электроснабжение сельского хозяйства. М.: Изд-во «Колос», 2000. 536 с.

13. Расторгуев В.М. О проблемах и путях развития сельских электрических сетей // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2018. № 29. С. 28–32.

14. Черкасова Н.И. Анализ состояния сельских электрических сетей 10 кВ в свете мониторинга отказов // Ползуновский Вестник. 2012. № 4. С. 49–54.

15. Бузин С., Воротницкий В. Современная релейная защита и автоматика для целей автоматизации воздушных электрических сетей 6–10 кВ. СПб: ООО «РК Таврида Электрик». 2010. 4 с.

16. Реклоузеры 6–20 кВ // Таврида Электрик [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tavrida.com/ter/solutions/REC15/> (28.09.2019).

17. Реклоузеры OSM15 // Тяжмаштрейд. Энергетика инноваций [Электронный ресурс]. URL: <https://tmtrade.ru/reklouzery-osm15-na-10-kv> (28.09.2019).

18. Овчинников А. Надежность распределительных электрических сетей 6 (10) кВ автоматизация с применением реклоузеров // Новости электротехники. 2002. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/17/08.php> (27.09.2019).

19. Воротницкий В., Бузин С. Реклоузер – новый уровень автоматизации и управления ВЛ 6 (10) кВ // Новости Электротехники. 2005. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/11.php> (27.09.2019).

20. Хачатуров А.А. Несинхронные включения и ресинхронизация в энергосистемах. М.: Энергия, 1977. 176 с.

21. Устройство точной автоматической синхронизации «Спринт-М» // Радиус автоматика [Электронный ресурс]. URL: https://www.rza.ru/catalog/zahita-i-avtomatika-stacionnogo-oborudovaniya/sprint-m.php?sphrase_id=29938&click=130 (15.09.2019).

22. Solutions for excitation and synchronization // ABB. Power electronics. 2018. P. 56. [Электронный ресурс]. URL: <https://new.abb.com/power-electronics> (15.09.2019).

References

1. Fishov AG, Gulomzoda AH, Kasobov LS. Analysis of the State and Direction of Development of Small Hydropower of Tajikistan. *Politehnicheskii Vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* = Polytechnic Bulletin. Series: Engineering studies. 2019;1:13–20. (In Russ.)

2. Tajikistan. Rapid Assessment and Gap Analysis. Available from: www.book.lib-i.ru/25selskohozyaistvo/685622-1-tadzhikistan-ekspres-ocenka-analiz-probelov-kratkoe-rezюме-energetika-zanimaet-tadzhikistane-oso.php [Accessed 28th September 2019].

3. Gulomzoda A, Nikroshkina SV. Development of Small-Scale Hydropower Generation in Tajikistan. In: *Progress through Innovations: tr. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. aspirantov i magistrantov = Progress through Innovations: Proceedings of 8th International Scientific and Practical Conference of Graduate and Postgraduate Students*. 28 March 2019, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2019, p. 123–126.

4. CASA-1000. Available from: <http://www.casa-1000.org/indexr.php> [Accessed 28th September 2019].



5. Gulomzoda A, Fishov AG, Nikroshkina SV. Technology of Managing the Modes of Local Energy Supply Systems. In: *Science. Research. Practice: trudy 2 Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov i magistrantov* = Science. Research. Practice: Proceedings of II All-Russia Scientific and Practical Conference of Postgraduate and Undergraduate Students. 20 December 2018, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2019, p. 70–72.
6. Ismoilov ST, Gulomzoda AH, Rahimov FM. Introduction of Distributed Generation into Network to Provide System Services. In: *Social'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki: materialy XI Mezhdunarodnoj konferencii* = Socio-Economic and Environmental Problems of Mining, Construction and Energy: Materials of XI International Conference. 5–6 November 2015, Tula. Tula: Tula State University; 2015, p. 362–367. (In Russ.)
7. Xuesong Zhou, Tie Guo, Youjie Ma. An overview on Microgrid Technology. In: *International Conference on Mechatronics and Automation*. 2–5 August 2015, Beijing. Beijing: IEEE; 2015, p. 76–81. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2015.7237460>
8. Barnes M, Kondoh J, Asano H, Oyarzabal J, Ventakaramanan G, Lasseter R, et al. Real-World Microgrids-An Overview. In: *International Conference on System of Systems Engineering*. 16–18 April 2007, San Antonio. San Antonio: IEEE; 2007. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4304255> [Accessed 28th September 2019]. <https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2007.4304255>
9. Zaidi AA, Kupzog F. Microgrid automation – A Self-Configuring Approach. In: *International Multitopic Conference*. 23–24 December 2008, Karachi. Karachi: IEEE; 2008, p. 565–570. <https://doi.org/10.1109/INMIC.2008.4777802>
10. Gezha EN, Glazyrin VE, Glazyrin GV, Ivkin ES, Marchenko AI, Semendyaev RYu, et al. System Automation to Integrate Local Power Supply Systems and Synchronous Small Generation into Electric Networks. *Relejschik*. 2018;2:24–31. (In Russ.)
11. Fishov AG, Mukatov BB, Marchenko AI. *Method of Emergency Control of Synchronous Generator Parallel Operation in Electric Networks*. Patent RF, no. 2662728 S2; 2018. (In Russ.)
12. Budzko IA, Leshchinskaya TB, Sukmanov VI. *Agriculture Power Supply*. Moscow: Kolos; 2000, 536 p. (In Russ.)
13. Rastorguev VM. On Problems and Development Trends of Rural Electric Networks. *Vestnik Rossijskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta* = Herald of Russian State Agrarian Correspondence University. 2018;29:28–32. (In Russ.)
14. Cherkasova NI. Analysis of the State of 10 kV Rural Electric Networks in terms of Failure Monitoring. *Polzunovskii Vestnik*. 2012;4:49–54. (In Russ.)
15. Buzin S, Vorotnickij V. Modern Relay Protection and Automation for 6–10 kV Overhead Electrical Networks Automation. Saint-Petersburg: RK Tavrida Elektrik; 2010, 4 c. (In Russ.)
16. 6–20 kV Reclosers. *Tavrida Elektrik*. Available from: <http://www.tavrida.com/ter/solutions/REC15/> [Accessed 28th September 2019]. (In Russ.)
17. OSM15 Reclosers. *Tyazhmashtrejd. Energetika innovacij*. Available from: <https://tmtrade.ru/reklouzery-osm15-na-10-kv> [Accessed 28th September 2019]. (In Russ.)
18. Ovchinnikov A. Reliability of 6 (10) kV Distribution Electric Networks, Recloser-Based Automation. *Novosti elektrotehniki* = Electrical Engineering News. 2002;5. Available from: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/17/08.php> [Accessed 27th September 2019]. (In Russ.)
19. Vorotnickij V, Buzin S. Recloser as a New Level of Automation and Control of 6 (10) kV Overhead Lines. *Novosti Elektrotehniki* = Electrical Engineering News. 2005;3. Available from: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/11.php> [Accessed 27th September 2019]. (In Russ.)
20. Khachaturov AA. *Non-Synchronous Switching and Resynchronization in Power Systems*. Moscow: Energy; 1977, 176 p. (In Russ.)
21. Sprint-M Device for Accurate Automatic Synchronization. Radius avtomatika. Available from: https://www.rza.ru/catalog/zahita-i-avtomatika-stacionnogo-oborudovaniya/sprint-m.php?sphrase_id=29938&click=130 [Accessed 15th September 2019]. (In Russ.)
22. Solutions for Excitation and Synchronization. *ABB. Power Electronics*. 2018, p. 56. Available from: <https://new.abb.com/power-electronics> [Accessed 15th September 2019].

Критерии авторства

Фишов А.Г., Гуломзода А.Х., Касобов Л.С. 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Fishov A.G., Ghulomzoda A.Kh., Kasobov L.S. 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.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Фишов Александр Георгиевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматизированных
электроэнергетических систем,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20,
Россия;
✉ e-mail: fishov@ngs.ru

Гуломзода Анвари Хикмат,
аспирант,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20,
Россия;
e-mail: anvar_4301@mail.ru

Касобов Лоик Сафарович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электрические станции»,
Таджикский технический университет
им. акад. М.С. Осими,
734042, г. Душанбе, ул. акад. Раджабовых, 10,
Таджикистан;
e-mail: loikjon1001@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander G. Fishov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department
of Automated Electric Power Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20 Karl Marx Ave., Novosibirsk 630073, Russia;
✉ e-mail: fishov@ngs.ru

Anvari Kh. Ghulomzoda,
Postgraduate Student,
Novosibirsk State Technical University,
20 Karl Marx Ave., Novosibirsk 630073, Russia;
e-mail: anvar_4301@mail.ru

Loik S. Kasobov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Electric Stations,
Tajik Technical University named
after Academician M.S. Osimi,
10 Akad. Radzhabovykh, Dushanbe 734042,
Tajikistan;
e-mail: loikjon1001@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.331

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-396-407>

Анализ резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой

© Д.А. Шандрыгин, В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, М.В. Маньшин

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: Целью исследования является анализ резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой, а также изучение взаимного влияния тяговой сети и сети внешнего электроснабжения. Одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии в сетях высокого напряжения являются мощные нелинейные нагрузки. К числу таких нагрузок относятся системы тягового электроснабжения, значительное влияние они оказывают на системы электроснабжения с малой мощностью короткого замыкания. Рассмотрена имитационная модель системы электроснабжения с тяговой нагрузкой, реализованная в программном комплексе Matlab. С помощью предложенной модели исследовано влияние на резонансные режимы различных параметров системы электроснабжения, в том числе длину линий, мощность короткого замыкания системы внешнего электроснабжения, а также спектральный состав токов электроподвижного состава на степень искажения напряжений в тяговой и внешней сетях. Получены аналитические выражения, позволяющие определить частоты резонансов системы «внешняя сеть – тяговый трансформатор – тяговая сеть». С помощью имитационной модели проведен анализ резонансных режимов в системе электроснабжения, включающей тяговую сеть переменного тока и внешнюю сеть. Показано, что причиной искажений напряжения в системах электроснабжения с тяговой нагрузкой являются несинусоидальные токи и резонансные режимы тяговой сети, возникающие в системе внешнего электроснабжения. При исследовании резонансных режимов систему тягового электроснабжения и внешнюю сеть следует рассматривать как единую систему. Ее частотные характеристики имеют резонансные максимумы, частота и амплитуда которых зависят как от параметров тяговой сети, так и параметров систем внешнего электроснабжения.

Ключевые слова: качество электроэнергии, системы тягового электроснабжения, системы внешнего электроснабжения, резонансные режимы

Информация о статье: Дата поступления 28 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 17 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Шандрыгин Д.А., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Маньшин М.В. Анализ резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 396–407. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-396-407>

An analysis of resonant modes in electric power systems with a traction load

Denis A. Shandrygin, Valery P. Dovgun, Denis E. Egorov, Maxim V. Manshin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: This research aims to investigate resonant modes in electric power systems with a traction load, as well as to study the cross-effect of the traction network and the external power supply network. Powerful non-linear loads represent one of the major reasons for the deterioration of the quality of electricity in high voltage networks. Among these loads are traction power supply systems, which have a significant effect on power supply systems with low values of the short circuit power. In the present study, a Matlab simulation model of a power supply system with a traction load was developed in order to investigate the effect of various parameters of the power supply system, such as the line length and the short circuit power of the external power supply system, on the resonant modes. Additionally, the effect of the spectral composition of currents in electric vehicles on the degree of voltage distortion in the traction and external networks was considered. Analytical expressions were obtained for the resonance frequencies in the "external network – traction transformer – traction network" system. Using the developed simulation model, an analysis of the resonant modes in the power supply system comprising a traction AC network and an external network was carried out. It is shown that voltage distortions in power supply systems with a traction load result from non-sinusoidal currents and the resonant modes of the traction network emerging in the external power supply system. When studying resonant modes, the traction power supply system and the external network should be considered as a single system. The frequency response characteristics of this

system have resonance maxima, the frequency and amplitude of which depend on the parameters of both the traction network and the external power supply system.

Keywords: electric energy quality, traction power supply systems, external power supply systems, resonant modes

Information about the article: Received February 28, 2020; accepted for publication March 17, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Shandrygin DA, Dovgun VP, Egorov DE, Manshin MV. An analysis of resonant modes in electric power systems with a traction load. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):396–407. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-396-407>

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии в сетях высокого напряжения являются мощные нелинейные нагрузки промышленных потребителей. К числу таких потребителей относятся системы тягового электроснабжения (СТЭ). Тяговые подстанции электрифицированных железных дорог получают энергию от систем внешнего электроснабжения (СВЭ) напряжением 110–220 кВ. Негативное влияние тяговых нагрузок на качество электроэнергии заключается в искажении синусоидальной формы напряжений в тяговой сети, а также значительной несимметрии и несинусоидальности напряжений в системе внешнего электроснабжения. Особенно значительное влияние СТЭ оказывают на системы электроснабжения с малой мощностью короткого замыкания. В некоторых регионах страны системы тягового электроснабжения являются первопричиной ухудшения качества электрической энергии¹ [1, 2].

Системы тягового электроснабжения переменного тока обладают особенностями, которые отличают их от общепромышленных сетей. Электроподвижной состав (ЭПС) переменного тока представляет собой мощную однофазную нелинейную нагрузку, изменяющуюся во времени. Гармонический состав токов зависит от типа и режима работы локомотивов. Основной схемой силовых преобразователей, используемых в отечественных электровозах переменного тока, является мостовая схема, реализованная на основе силовых ти-

ристоров [3]. Тиристорные преобразователи электровозов вызывают значительные искажения потребляемого тока, сопровождающиеся образованием высших гармонических составляющих напряжения на токоприемнике электровоза [4, 5]. К тому же такие преобразователи имеют низкий коэффициент мощности.

На новых локомотивах используются асинхронные тяговые двигатели, получающие питание от преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Такие преобразователи имеют близкий к 1 коэффициент мощности. Суммарные гармонические искажения токов не превышают 5% [6–8]. Однако входные токи преобразователей с ШИМ имеют широкий спектр. Это может вызвать искажение напряжений как в тяговой, так и внешней сетях из-за резонансного усиления отдельных гармоник [6].

Вторая особенность электроэнергетических систем с тяговыми нагрузками состоит в том, что по отношению к гармоникам высокого порядка как внешняя, так и контактная сеть являются системами с распределенными параметрами. Волновые процессы в таких системах сопровождаются резонансными явлениями, которые вызывают значительные искажения напряжения. Взаимное влияние СВЭ и тяговой сети приводят к тому, что фактические значения показателей качества электрической энергии в тяговой сети и в системе внешнего электроснабжения выходят за пределы существующих стандартов. Резонансные явления в тяговых сетях оказывают мешающее влияние на устройства проводной свя-

¹Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Насыров Р.Р. Управление качеством электроэнергии: учеб. пособ. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 347 с.



зи, хрупкое электронное оборудование [7–10]. Это определяет необходимость применения специальных мер для демпфирования резонансных режимов.

В статье приведены результаты анализа резонансных режимов в системе электроснабжения, включающей тяговую сеть переменного тока и внешнюю сеть. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить частоты резонансов системы «внешняя сеть – тяговый трансформатор – тяговая сеть». Рассмотрена имитационная модель системы электроснабжения с тяговой нагрузкой, реализованная в программном комплексе Matlab. С помощью предложенной модели исследовано влияние на резонансные режимы различных параметров системы электроснабжения (СЭС), в т.ч. длину линий, мощность короткого замыкания системы внешнего электроснабжения, а также спектральный состав токов электроподвижного состава на степень искажения напряжений как в тяговой, так и во внешней сетях.

2. ИСТОЧНИКИ ГАРМОНИК В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В спектрах несинусоидальных токов и напряжений в системах тягового электроснабжения принято выделять три группы гармоник [6–8].

К первой группе относятся фоновые гармоники напряжения, создаваемые нелинейными устройствами, подключенными к системе внешнего электроснабжения. Как правило, в спектре фоновых гармоник учитывают 5, 7, 11, 13 гармоники. Уровень отдельных фоновых гармоник может увеличиться из-за резонансных явлений в системе электроснабжения.

Вторую группу составляют характеристические гармоники, которые зависят от типа ЭПС и режимов его работы. В спектре тока I_n однофазного тиристорного преобразователя преобладают 3, 5 и 7 гармоники

[4–6]. Расчетные значения гармонических составляющих тягового тока ЭПС с тиристорным преобразователем (в процентах от основной гармоники) представлены в таблице [10].

Значения гармонических составляющих тягового тока электроподвижного состава Values of harmonic components of electric rolling stock traction current

n^*	3	5	7
I_n	17–24	7,2–8,9	3,3–8,2

* n – порядковый номер гармоники

В электровозах с асинхронными тяговыми двигателями характеристические гармоники токов имеют более высокий порядок. Их частоты кратны частоте коммутации ШИМ-преобразователей. Например, если частота коммутации равна 1250 Гц, то в спектре тока преобладают гармоники 45–55 порядка² [6–8, 12, 13]. Низкочастотные гармоники электровозов с асинхронными двигателями являются нехарактеристическими и имеют значительно меньший уровень. Как правило, суммарный коэффициент гармоник тока, создаваемых ЭПС с асинхронными двигателями, не превышает 5% [6].

В тяговой сети может наблюдаться усиление отдельных гармоник, если их частоты близки или совпадают с резонансными частотами СЭС. Такие гармоники в [6, 7] названы резонансными. В преобразователях с ШИМ резонансными могут оказаться неканонические низкочастотные гармоники.

3. АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Представим рассматриваемую СЭС в виде эквивалентной схемы, образованной каскадным соединением четырехполюсников рис. 1 (здесь Z_{enc} – входное сопротивление

²Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. Утв. министерствами связи и путей сообщения СССР в окт. 1987 г. М.: Транспорт, 1989. 134 с.

ление сети, U – напряжение, L – индуктивность сети, C – емкость сети).

Внешняя и тяговая сети представлены Г-образными LC-четырёхполюсниками. Фоновые гармоники внешней сети моделирует источник напряжения E_k (k – порядковый номер гармоники). Источник тока моделирует гармоники тока, создаваемые преобразователем электровоза. Для упрощения расчетов тяговый трансформатор представлен простейшей моделью в виде идеального трансформатора, матрица цепных параметров которого

$$[A] = \begin{bmatrix} 1/n & 0 \\ 0 & n \end{bmatrix},$$

где n – коэффициент трансформации.

Анализируя эквивалентную схему на рис. 1, получим, что входное сопротивление сети относительно токоприемника ЭПС определяется выражением

$$Z_{\text{ЭПС}} = \frac{p(p^2 + b_0)}{C_2(p^4 + p^2 a_1 + a_0)}, \quad (1)$$

где p – комплексная частотная переменная; a_0, a_1, b_0 – коэффициенты полиномов.

Передающее сопротивление между токоприемником ЭПС и первичной обмоткой тягового трансформатора

$$Z_{\text{ЭПС-Tr}} = \frac{U_1}{J_k} = \frac{pb_1}{(p^4 + p^2 a_1 + a_0)}. \quad (2)$$

В последних выражениях U_1 – напряжение первичной обмотки тягового трансформатора. Коэффициенты полиномов числителя и знаменателя определяются выражениями:

$$a_0 = \frac{1}{L_1 L_2 C_1 C_2}; \quad a_1 = \frac{1}{n^2 L_2 C_1} + \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2};$$

$$b_0 = \frac{(L_1/n^2) + L_2}{L_1 L_2 C_1}; \quad b_1 = \frac{1}{n^2 L_2 C_1 C_2}.$$

Корни полиномов числителей в формулах (1) и (2) определяют частоты последовательных, а корни полиномов знаменателей – частоты параллельных резонансов в системе электроснабжения. В соответствии с (1) и (2) на резонансные частоты СЭС влияют как тяговая, так и внешняя сети. Поскольку знаменатели в обеих формулах совпадают, частоты максимумов $Z_{\text{ЭПС}}$ и $Z_{\text{ЭПС-Tr}}$ (здесь Tr – передаточное сопротивление между токоприемником ЭПС и первичной обмоткой тягового трансформатора), соответствующие параллельным резонансам, одинаковы. Следовательно, происходит усиление гармоник напряжения одинакового порядка как на токоприемнике ЭПС, так и во внешней сети.

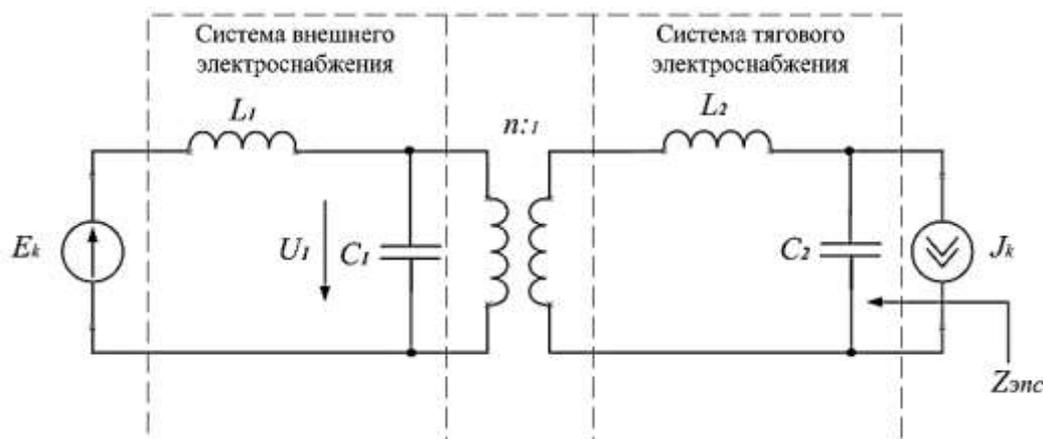


Рис. 1. Схема замещения системы внешнего электроснабжения и системы тягового электроснабжения

Fig. 1. Equivalent circuit of external power supply and traction power supply systems



4. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аналитические выражения, полученные в предыдущем разделе, являются приближенными. Они позволяют качественно оценить влияние параметров системы электроснабжения на резонансные частоты. Для подробного анализа процессов в СЭС, питающей тяговую нагрузку, необходима более детальная модель. Схема предлагаемой имитационной модели системы электроснабжения показана на рис. 2. Она включает систему внешнего электроснабжения напряжением 220 кВ, тяговый трансформатор, тяговую сеть напряжением 27,5 кВ. Электроподвижной состав моделируется источниками тока.

Модель внешней сети представляет каскадное соединение П-образных четырехполюсных секций. Каждая секция соответствует участку длиной 10 км. Модель учитывает активное и индуктивное сопротивление проводов, емкость между прово-

дом и глухозаземленной нейтралью трансформатора. При моделировании воздушной линии учитывались параметры провода АС-300/39. Активное сопротивление провода равно 1,08 Ом/км, индуктивность составляет 0,0013 Гн/км, емкость между проводом и нейтралью принята равной 0,0086 мкФ/км.

Сеть тягового электроснабжения также представлена моделью в форме каскадного соединения П-образных секций длиной 10 км [14]. В модели контактной сети приняты следующие условия: марка троса ПБСМ-95, контактный провод МФ-100, тип рельса Р75. Действующее значение тока ЭПС принято равным 780 А. При построении имитационной модели тягового электроснабжения считаем, что фазы А и В питают разные плечи тяговой подстанции, фаза С подключена к рельсу.

ЭПС моделируется источниками тока. Действующие значения токов гармоник приведены в таблице.

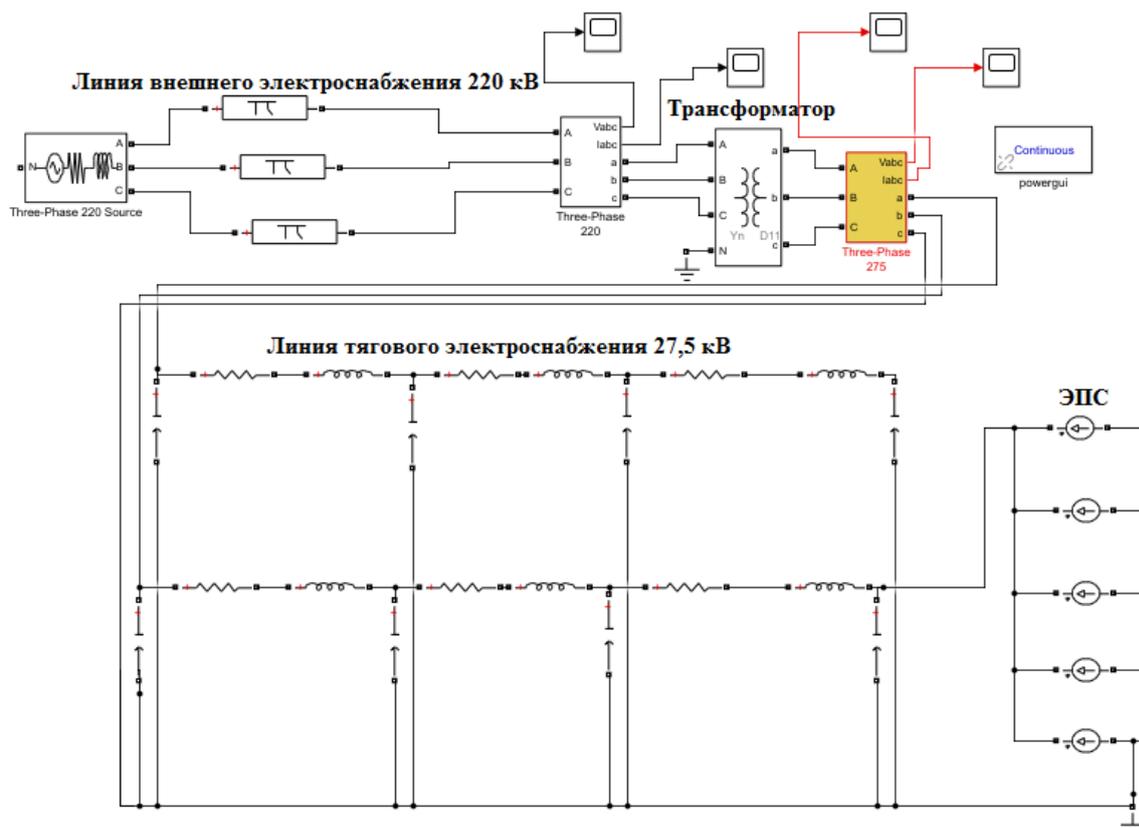


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения
Fig. 2. Simulation model of the power supply system

Предлагаемая модель энергосистемы позволяет исследовать влияние мощности короткого замыкания СВЭ и спектрального состава токов электроподвижного состава на степень искажения напряжений как в тяговой сети, так и в системе внешнего электроснабжения.

На рис. 3 а–с показаны частотные характеристики сопротивления тяговой сети относительно токоприемника ЭПС при

изменении длины внешней сети от 10 до 100 км. Длина тяговой сети фиксирована и равна 30 км. Электровоз находится в конце участка тяговой сети на посту секционирования.

На рис. 4 а–с показаны частотные характеристики передаточного сопротивления между токоприемником электровоза и первичной обмоткой тягового трансформатора.

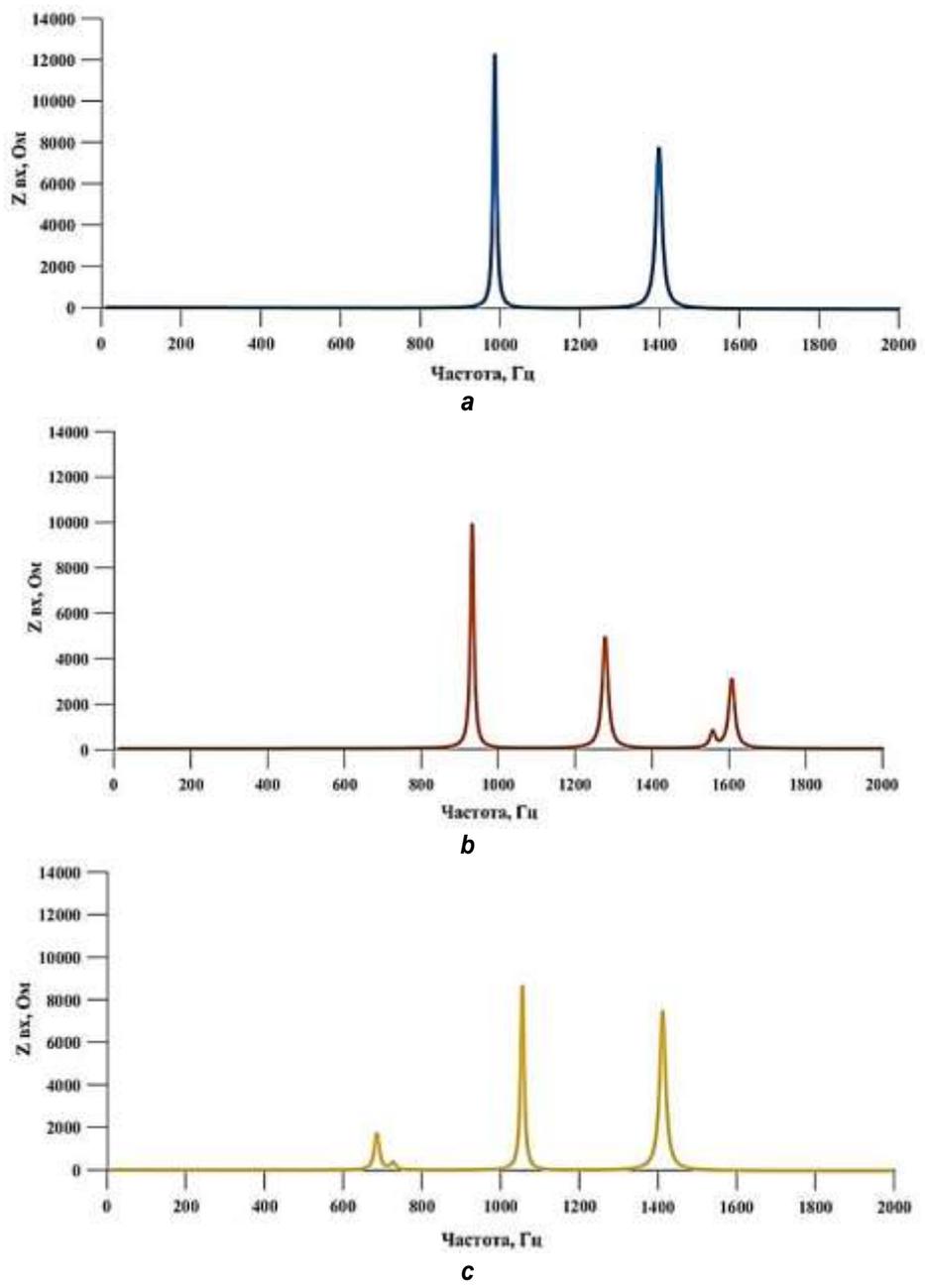


Рис. 3. Частотные характеристики сопротивления тяговой сети: а – длина внешней линии 10 км; б – длина внешней линии 50 км; с – длина внешней линии 100 км
Fig. 3. Frequency characteristics of traction network resistance: а – 10 km external line; б – 50 km external line; с – 100 km external line

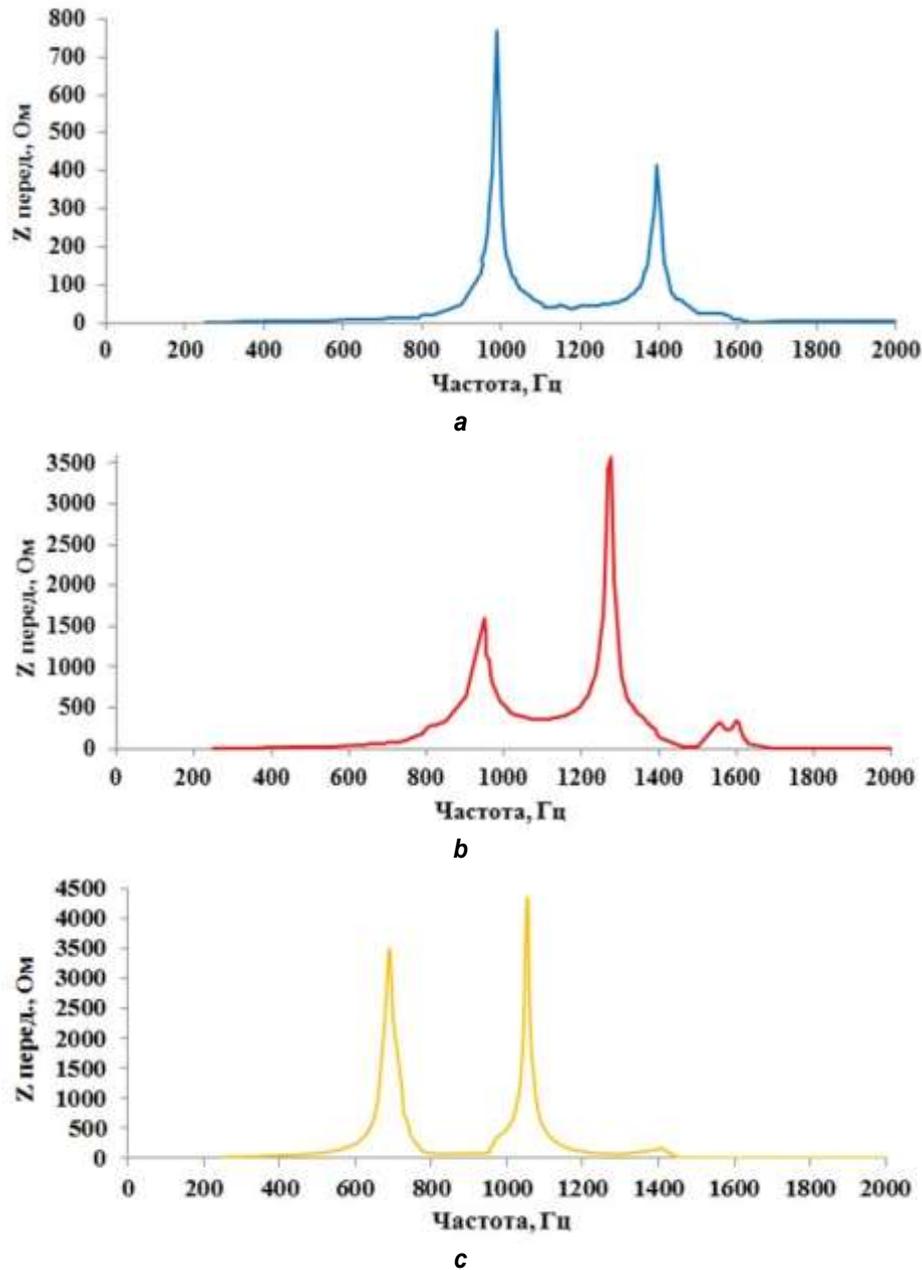


Рис. 4. Частотные характеристики передаточного сопротивления: а – длина внешней линии 10 км; б – длина внешней линии 50 км; с – длина внешней линии 100 км
Fig. 4. Frequency response characteristics of transfer resistance: а – 10 km external line; б – 50 km external line; с – 100 km external line

Из рис. 3 и 4 следует, что частотные характеристики рассматриваемой системы электроснабжения имеют резонансные максимумы, частоты которых зависят от длины ЛЭП 220 кВ, т.е. мощности короткого замыкания внешней сети. Важно отметить, что частоты максимумов одинаковы. Следовательно, происходит резонансное усиление гармоник одинакового порядка как в тяговой, так и во внешней сетях. При сни-

жении мощности короткого замыкания внешней сети частоты максимумов сдвигаются в область низких частот. Резонансные явления могут вызвать усиление гармоник напряжения и тока в диапазоне частот 500–1000 Гц как в тяговой сети, так и на шинах 220 кВ. Следует учитывать также, что на резонансные частоты влияют и изменения режимов СВЭ.

На рис. 5 показаны спектры напря-

жений на токоприемнике локомотива при питании тягового трансформатора по ЛЭП 220 кВ. Спектры напряжений на стороне линии внешнего электроснабжения показаны на рис. 6. Рассматривались варианты, когда длина линии составляла 10, 50 и 100 км. Особенно заметно усиление гармоник, частоты которых близки к частотам парал-

ельных резонансов системы. Суммарный коэффициент гармоник напряжения на токоприемнике локомотива превышает 50%, а суммарный коэффициент гармоник напряжения на шинах 220 кВ достигает 5,23%, что превышает предельно допустимое значение, определяемое ГОСТ 32144-2013³.

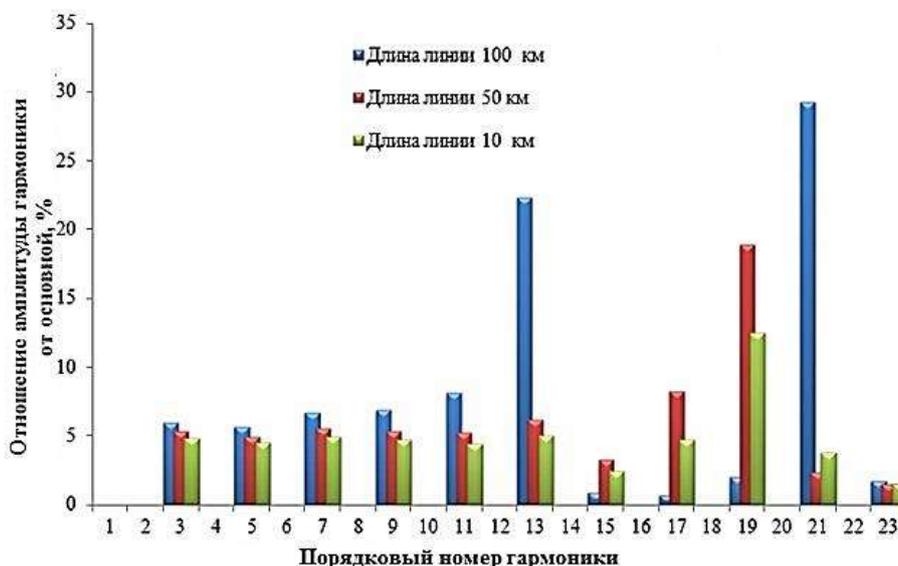


Рис. 5. Спектр напряжения на токоприемнике локомотива
Fig. 5. Voltage spectrum of the locomotive current collector

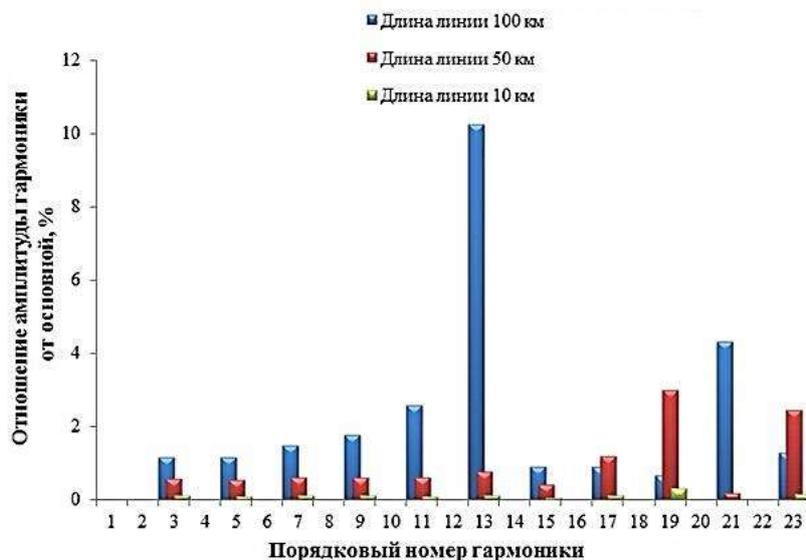


Рис. 6. Спектр напряжения на стороне линии внешнего электроснабжения
Fig. 6. Voltage spectrum on the side of the external power supply line

³ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014.



Наиболее тяжелый режим наблюдается при малой мощности короткого замыкания внешней сети, когда длина линии 220 кВ максимальна.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что причиной искажений напряжения в системах электроснабжения с тяговой нагрузкой являются искажения формы токов, потребляемых ЭПС, и резонансные режимы, возникающие в системе «СВЭ – тяговая сеть». При исследовании резонансных режимов систему тягового электроснабжения и внешнюю сеть следует рассматривать как единую систему. Ее частотные характеристики имеют резонансные максимумы, частота и амплитуда которых зависят как от параметров тяговой сети, так и параметров СВЭ. При уменьшении мощности короткого замыкания внешней сети, т.е. при увеличении ее длины, экстремумы частотных характеристик смещаются в область низких частот. Это вызывает усиление гармоник напряжения и тока меньшего порядка, имеющих, как правило, большую амплитуду.

Таким образом, резонансные явления, возникающие при питании систем тягового электроснабжения по ЛЭП значительной протяженности, оказывают негативное влияние как на тяговую сеть, так и на систему внешнего электроснабжения. Для повышения качества электроэнергии и энергоэффективности систем тягового

электроснабжения необходимо проведение комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на нормализацию качества электроэнергии.

Основным техническим средством нормализации качества электроэнергии в СТЭ являются пассивные и активные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), осуществляющие компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник тока и напряжения [15–17]. Благодаря своей простоте и надежности, основным видом компенсирующих устройств в системах тягового электроснабжения остаются пассивные фильтрокомпенсирующие устройства. В тяговых сетях используются типовые узкополосные ФКУ, осуществляющие компенсацию реактивной мощности и подавление наиболее мощных 3 и 5 гармоник тока тяговой нагрузки [18–20]. Недостаток узкополосных ФКУ заключается в том, что они осуществляют подавление только низкочастотных 3 и 5 гармоник. Анализ, проведенный в [17], показал, что примерно на 50% подстанций необходима установка компенсирующих устройств, позволяющих уменьшить суммарный коэффициент гармоник напряжения на токоприемнике локомотива и снизить перенапряжения за счет демпфирования резонансных режимов. Необходим поиск новых, более эффективных структур ФКУ, обеспечивающих электромагнитную совместимость систем тягового и внешнего электроснабжения за счет коррекции их частотных характеристик.

Библиографический список

1. Коверникова Л.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Качество электроэнергии в ЕЭС России: текущие проблемы и необходимые решения // Энергоэнергетика: Передача и распределение. 2016. № 2. С. 40–51.
2. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Воробьев А.Ю. Управление качеством электроэнергии / под ред. Ю.В. Шарова. М.: Изд. дом МЭИ, 2006. 320 с.
3. Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2016. Т. 75. № 1. С. 26–34.

- <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-0-1-26-34>
4. Кучумов В.А., Ермоленко Д.В. Показатели качества электроэнергии на токоприемнике и взаимодействие ЭПС с системой тягового электроснабжения переменного тока // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1997. № 2. С. 11–16.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Моделирование резонансных процессов на высших гармониках в тяговых сетях переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3. С. 214–221.
6. Hu Haitao, Shao Yang, Tang Li, Ma Jin, He Zhengyou, Gao Shibin. Overview of Harmonic and

Resonance in Railway Electrification Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. Issue 5. P. 5227–5245. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2813967>

7. Hu Haitao, He Zhengyou, Gao Shibin. Passive Filter Design for China High-Speed Railway With Considering Harmonic Resonance and Characteristic Harmonics // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. Vol. 30. No. 1. P. 505–514. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2359010>

8. Gao Shibin, Li Xin, Ma Xiaolan, Hu Haitao, He Zhengyou, Yang Jian-wei Yang. Measurement-based compartmental modeling of harmonic sources in traction power-supply system // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32. No. 2. P. 900–909. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2578962>

9. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии: монография. Иркутск: Изд-во ИР-НИТУ, 2015. 218 с.

10. Wang Jinhao, Li Huipeng, Feng Lei, Xu Long, Lv Xiaohui, Xu Yonghai. Analysis of power quality Issues of electrified railway // 8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (Cape Town, 3–6 February 2017). Cape Town: IEEE, 2017. P. 179–182. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2017.7917459>

11. Важенина И.Г., Довгун В.П., Новиков В.В., Синяговский А.Ф. Обеспечение электромагнитной совместимости в системах тягового электроснабжения с регулируемыми фильтрокомпенсирующими устройствами // Технологии электромагнитной совместимости. 2017. № 3. С. 13–21.

12. Liu Zhigang, Xiang Chuan, Wang Yaqi, Liao Yicheng, Zhang Guinan. A Model-Based Predictive Direct Power Control for Traction Line-Side Converter in High-Speed Railway // Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (Busan, 1–4 June 2016). Busan: IEEE, 2017. Vol. 53. No. 5. P. 4934–4943. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2016.7512936>

13. Lee Hanmin, Lee Changmu, Jang Gilsoo, Kwon Sae-hyuk. Harmonic Analysis of the Korean High-Speed Railway Using the Eight-Port Representation Model // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006.

Vol. 21. No. 2. P. 979–986. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.870985>

14. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть – электровоз» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35.

15. Akagi H. Active Harmonic Filters // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. Issue 12. P. 2128–2141. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1545766> (17.02.2019). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>

16. Шандрыгин Д.А., Егоров Д.Э., Новиков В.В., Довгун В.П. Анализ эффективности пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для систем тягового электроснабжения // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2019. № 1. С. 91–103. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2019-1-91-103>

17. Герман Л.А., Серебряков А.С., Ермоленко Д.В., Гончаренко В.П., Кващук В.А., Максимова А.А. Установки поперечной емкостной компенсации с фильтрацией и демпфированием высших гармоник в тяговых сетях переменного тока // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2014. № 1. С. 47–54.

18. Довгун В.П., Сташков И.А. Двухрезонансные силовые фильтры для систем тягового электроснабжения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 2. С. 217–220.

19. Tan Pee-Chin, Morrison R.E., Holmes D.G. Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. Vol. 39. No. 2. P. 575–581. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.809455>

20. Mousavi Gazafrudi S.M., Tabakhpour Langerudy A., Fuchs E.F., Al-Haddad K. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62. Issue 5. P. 3081–3090. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2386794>

References

1. Kovernikova LI, Tul'skij VN, Shamonov RG. Quality of Electrical Energy in the Russian National Grid: Current Problems and Required Solutions // Electricity: Transmission and distribution. *Elektroenergiya: Peredacha i raspredelenie* = Energy Systems Research. 2016;2:40–51. (In Russ.)

2. Kartashev II, Tul'skij VN, Shamonov RG, Sharov YuV, Vorob'yov AYU. *Power Quality Management*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2006, 320 p. (In Russ.)

3. German LA, Serebryakov AS, Maksimova AA. Filter Compensating Installations in AC Traction Networks. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta*

zheleznodorozhnogo transporta = Vestnik of the Railway Research Institute (Vestnik VNIIZHT). 2016;75(1):26–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-0-1-26-34>

4. Kuchumov VA, Ermolenko DV. Current Collector Power Quality Indicators and Electric Stock and AC Traction Power Supply System Interaction. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* = Vestnik of the Railway Research Institute (Vestnik VNIIZHT). 1997;2:11–16. (In Russ.)

5. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Cherepanov AV. Modelling of Highest Harmonics Resonant Processes in Alternating Current Traction Nets. *Sovremennye*



tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern Technologies. System analysis. Modeling. 2016;3:214–221. (In Russ.)

6. Hu Haitao, Shao Yang, Tang Li, Ma Jin, He Zhengyou, Gao Shibin. Overview of Harmonic and Resonance in Railway Electrification Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018;54(5):5227–5245.

<https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2813967>

7. Hu Haitao, He Zhengyou, Gao Shibin. Passive Filter Design for China High-Speed Railway with Considering Harmonic Resonance and Characteristic Harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015;30(1):505–514. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2359010>

8. Gao Shibin, Li Xin, Ma Xiaolan, Hu Haitao, He Zhengyou, Yang Jian-wei Yang. Measurement-based Compartmental Modeling of Harmonic Sources in Traction Power-Supply System. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017;32(2):900–909. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2578962>

9. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Cherepanov AV. *Intelligent Technologies of Power Quality Management*. Irkutsk: Irkutsk Technical University Publ.; 2015. 218 p. (In Russ.)

10. Wang Jinhao, Li Huipeng, Feng Lei, Xu Long, Lv Xiaohui, Xu Yonghai. Analysis of Power Quality Issues of Electrified Railway. *8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies*. 3–6 February 2017, Cape Town. Cape Town: IEEE; 2017, p. 179–182. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2017.7917459>

11. Vazhenina IG, Dovgun VP, Novikov VV, Sinyagovskij AF. Providing the Electromagnetic Compatibility in Traction Power Systems with Controlled Shunt Compensating Devices. *Tekhnologii elektromagnitnoj sovmestimosti* = Technologies of electromagnetic compatibility. 2017;3:13–21. (In Russ.)

12. Xiang Chuan, Liu Zhigang, Zhang Guinan, Liao Yicheng. A Model-Based Predictive Direct Power Control for Traction Line-Side Converter in High-Speed Railway. In: *Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific*. 1–4 June 2016, Busan. Busan: IEEE; 2017, vol. 53, no. 5, p. 4934–4943. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2016.7512936>

13. Lee Hanmin, Lee Changmu, Jang Gilsoo, Kwon

Sae-hyuk. Harmonic Analysis of the Korean High-Speed Railway Using the Eight-Port Representation Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006;21(2):979–986.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.870985>

14. Savos'kin AN, Kulinich YuM, Alekseev AS. Mathematical Modeling of Electromagnetic Processes in "Contact Network - Electric Locomotive" Dynamic System. *Elektrichestvo*. 2002;2:29–35. (In Russ.)

15. Akagi H. Active Harmonic Filters. In: *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(12):2128–2141. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1545766> [Accessed 17th February 2019].

<https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>

16. Shandrygin DA, Egorov DE, Novikov VV, Dovgun VP. Analysis of the Effectiveness of Passive Filter-Devices for Traction Power Supply. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii* = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences. 2019;1:91–103. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17212/1727-2769-2019-1-91-103>

17. German LA, Serebryakov AS, Yermolenko DV, Goncharenko VP, Kvaschuk VA, Maksimova AA. Installations for Capacitive Shunt Compensation with Filtration and Damping of Higher Harmonics within the AC Traction Networks. *Vestnik Naucno-issledovatel'skogo instituta zeleznodoroznogo transporta* = Vestnik of the Railway Research Institute (Vestnik VNIIZHT). 2014;1:47–54. (In Russ.)

18. Dovgun VP, Stashkov IA. Two-Resonance Power Filters for Electric Traction Systems. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015;2:217–220. (In Russ.)

19. Tan Pee-Chin, Morrison R.E., Holmes D.G. Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in a 25-kV Electrified Railway System using a Shunt Active Filter Based on Voltage Detection. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003;39(2):575–581. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.809455>

20. Mousavi Gazafardi SM, Tabakhpour Langerudy A, Fuchs EF, Al-Haddad K. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(5):3081–3090.

<https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2386794>

Критерии авторства

Шандрыгин Д.А., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Маншин М.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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Shandrygin D.A., Dovgun V.P., Egorov D.E., Manshin M.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.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шандрыгин Денис Александрович,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, Россия;
✉ e-mail: shandrygin2012@yandex.ru

Довгун Валерий Петрович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры систем автоматики,
автоматизированного управления и проектирования,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, Россия;
e-mail: valerydovgun@gmail.com

Егоров Денис Эдуардович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры систем автоматики,
автоматизированного управления и проектирования,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, Россия;
e-mail: denis.egorov.90@bk.ru

Маньшин Максим Валерьевич,
магистрант,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, Россия;
e-mail: olympisch@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis A. Shandrygin,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
26 Kirensky St., Krasnoyarsk 660074, Russia;
✉ e-mail: shandrygin2012@yandex.ru

Valery P. Dovgun,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Automation Systems,
Automated Control and Design,
Siberian Federal University,
26 Kirensky St., Krasnoyarsk 660074, Russia;
e-mail: valerydovgun@gmail.com

Denis E. Egorov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Automation
Systems, Automated Control and Design, Siberian
Federal University,
26 Kirensky St., Krasnoyarsk 660074, Russia;
e-mail: denis.egorov.90@bk.ru

Maxim V. Manshin,
Master Degree Student,
Siberian Federal University,
26 Kirensky St., Krasnoyarsk 660074, Russia;
e-mail: olympisch@list.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.785

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>

Расчет ожидаемой экономической эффективности производства алюминия за счет увеличения применения глинозема отечественного производства

© А.В. Александров*, Н.В. Немчинова**

*ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», г. Красноярск, Россия

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

Резюме: Цель работы – расчет ожидаемой экономической эффективности производства первичного алюминия (на примере АО «РУСАЛ Красноярск») за счет увеличения применения глинозема, получаемого из нефелинового сырья методом спекания на Ачинском глиноземном комбинате. Была проведена серия экспериментов по определению оптимальных условий охлаждения нефелиновых спеков с использованием лабораторной муфельной печи SNOL 6.7/1300. В качестве объекта исследований использовали промышленный образец известняково-нефелино-содовой шихты. Для определения фазового состава спеков использовался дифрактометр ДРОН-6 (Россия). Условия спекания шихт: скорость нагрева навески шихты – 10,4°С/мин, выдержка при температуре 1250°С – 15 мин. Установлено, что влияние скорости охлаждения на содержание α' -модификации в $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ спека носит обратный характер. По данным фазового анализа не отмечено изменений качественного и количественного состава по другим фазам (алюминат натрия, феррит кальция, карнегиит), составляющих структуру спека. Это указывает на то, что при охлаждении происходит развитие только твердофазных реакций перекристаллизации $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Из полученных зависимостей изменения содержания модификаций при охлаждении спеков с различными скоростями видно, что наблюдается характерное изменение наклона кривой, отражающей содержание α' -, β' -форм $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ в спеках при температуре 1000°С для всех скоростей охлаждения. Было установлено, что достаточно медленно (со скоростью не более 15°С/мин) охладить нефелиновый спек только до 1000°С, чтобы процесс перехода из α' - в β' -модификации $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ полностью завершился. По результатам проведенного технологического выщелачивания полученных спеков и обработки экспериментальных данных охлаждения (при 1250–1000°С) спеков на содержание α' -формы $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ в спеке установлено, что снижение содержания данной модификации на каждый 1% приводит к повышению извлечения глинозема на 0,2%. Ожидаемый годовой эффект от снижения себестоимости получения 1 т первичного алюминия за счет экономии на приобретение глинозема импортного производства составил 55830 тыс. руб.

Ключевые слова: производство глинозема, спекание нефелинов, извлечение глинозема, экономическая эффективность, технологическое выщелачивание, нефелиновые руды

Информация о статье: Дата поступления 09 января 2020 г.; дата принятия к печати 03 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Александров А.В., Немчинова Н.В. Расчет ожидаемой экономической эффективности производства алюминия за счет увеличения применения глинозема отечественного производства. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 408–420. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>

Calculation of the expected economic efficiency of aluminium production by increasing the use of domestic alumina

Alexander V. Aleksandrov*, Nina V. Nemchinova**

*RUSAL Engineering and Technology Center PLC, Achinsk, Russia

**Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: In this work, we aim to calculate gains in the economic efficiency of primary aluminium production (on the example of RUSAL Krasnoyarsk JSC) when increasing the use of alumina obtained from sintering nepheline raw materials at the Achinsk alumina plant. A series of experiments was conducted to determine the optimal conditions for cooling of nepheline cakes using a SNOL 6.7/1300 laboratory muffle furnace. An industrial sample of limestone-nepheline-soda mixture was used as a research object. In order to determine the phase composition of nepheline cakes,

a DRON-6 diffractometer (Russia) was used. The sintering conditions of charges were as follows: the heating rate of the sample charge was 10.4°C/min; exposure at the temperature of 1250 °C was 15 minutes. It is determined that the effect of the cooling rate on the content of α' -modification in 2CaO.SiO₂ cake is inverse. The analysis of phase data does not demonstrate any changes in the qualitative and quantitative composition of other phases (sodium aluminate, calcium ferrite, carnegieite) that make up the cake structure. This indicates that solid-phase 2CaO.SiO₂ recrystallisation reactions develop exclusively under cooling. The obtained dependences of modification content variation upon cake cooling with different rates show that there is a characteristic change in the slope of the curve, which reflects the content of α' -, β -forms of 2CaO.SiO₂ in cakes at the temperature of 1000°C for all cooling rates. It was found that slow cooling (at the rate of no more than 15°C/min) of nepheline cake up to only 1000°C is sufficient for the completion of 2CaO.SiO₂ transition from α' - to β -modification. The results of the conducted technological leaching of the obtained cakes and the processing of experimental data of cake cooling (at 1250–1000 °C) for the content of 2CaO.SiO₂ α' -form in cakes demonstrate that a 1% decrease in this modification content provides a 0.2% increase in alumina extraction. The expected annual effect of reducing the production cost of 1 tonne of primary aluminium due to savings on purchase of imported alumina amounts to 55.83 million rubles.

Keywords: alumina production, nepheline sintering, alumina extraction, economic efficiency, technological leaching, nepheline ores

Information about the article: Received January 09, 2020; accepted for publication March 03, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Aleksandrov AV, Nemchinova NV. Calculation of the expected economic efficiency of aluminium production by increasing the use of domestic alumina. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):408–420. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>

1. ВВЕДЕНИЕ

Практически 98% глинозема для алюминиевой промышленности в мире производят из высококачественных бокситов [1–4] и только 2% – путем комплексной переработки нефелинов [5–7]. По добыче бокситов Россия стоит на 6 месте в мире, а среди стран СНГ – на первом (62,7% общей добычи) [8].

Глинозем для предприятий по получению первичного алюминия ОК «РУСАЛ» в основном производят из бокситов, 41% получают при переработке нефелинов^{1,2} [9–14]. В России впервые в мире предложен и освоен в промышленности способ получения глинозема из нефелинов методом спекания.

Балансовые запасы нефелиновых руд в России заключены в 12 месторождениях, причем 81,2% приходятся на Кольский полуостров (апатит-нефелиновые месторождения Кольского полуострова разрабатывает открытым способом АО «Апатит»). Нефелиновые концентраты (1050–

1100 тыс. т в год) получают попутно, при производстве апатитового концентрата. Из других минеральных источников наиболее богаты нефелином уртитовые руды (Кия-Шалтырское месторождение для АО «РУСАЛ Ачинск» – Ачинского глиноземного комбината (АГК)).

В результате исследований, начатых вскоре после открытия апатито-нефелиновых руд, российскими учеными впервые в мировой практике разработана и внедрена в производство технология переработки Кольского нефелина путем спекания его с известняком [9]. Этот же способ заложен в основу технологии переработки руд Кия-Шалтырского месторождения [14] на АГК (рис. 1).

АГК выпускает более 950 тыс. т в год глинозема. Вторым предприятием по объемам производства является Пикалевский глиноземный завод, выпускающий ежегодно более 250 тыс. т продукции [15]. Комплексный подход к переработке нефелинов позволяет извлекать ряд сопутству-

¹ Логинова И.В., Кырчиков А.В. Производство глинозема: учеб. пособ. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. 186 с.

² Сизякова Е.В. Повышение эффективности способа комплексной переработки нефелинов на основе использования карбоалюминатных соединений: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. СПб., 2007. 186 с.

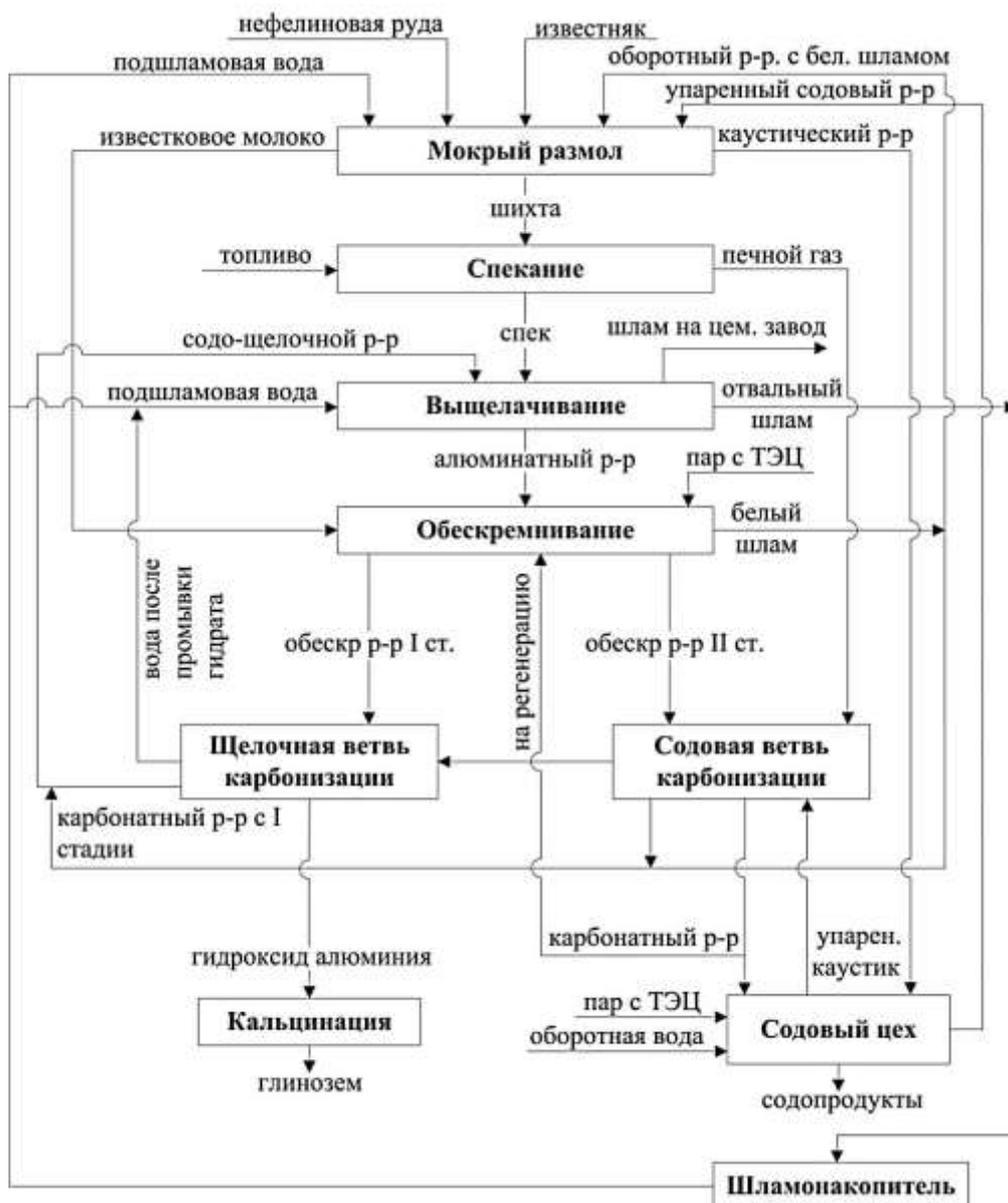
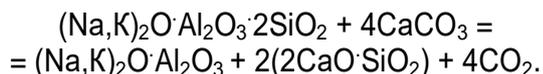


Рис. 1. Принципиальная схема получения глинозема из нефелинов методом спекания
Fig. 1. Schematic diagram of alumina production from nephelines by sintering

ющих продуктов: соду, поташ, сульфат и хлорид калия, галлий, цемент [10].

Как известно, способ спекания нефелинов состоит в переводе оксида алюминия, содержащегося в нефелине, в алюминаты натрия и калия с общей формулой – $(Na,K)_2O \cdot Al_2O_3$, хорошо растворимые в водных и щелочных растворах, и связывании оксида кремния в малорастворимый двухкальциевый силикат $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S). Шихта состоит из нефелина, известняка, белого шлама, полученного в результате обескремнивания алюминатного раствора, и оборотной воды (из расчета полу-

чения жидкотекучей пульпы с влажностью 28–31%). На АГК на приготовление шихты вводят также часть содового раствора после передела карбонизации и часть упаренного раствора из цеха кальцинированной соды (в Кия-Шалтырской нефелиновой руде недостаточно щелочи для образования при спекании шихты алюминатов). Шихта подается на спекание во вращающуюся печь (длиной 185 м и диаметром 5 м) и спекается при нагревании до температуры 1250–1300°C, которая обеспечивает взаимодействие компонентов по реакции:



В качестве топлива в печах используют тонкоизмельченный уголь. Отходящие газы после системы газоочистки используются для карбонизации раствора, а избыток их выбрасывают в атмосферу. Продуктом спекания является нефелиновый спек (рис. 2), который должен характеризоваться максимальным содержанием алюмината ($Na_2O \cdot Al_2O_3$) и феррита ($Na_2O \cdot Fe_2O_3$) натрия, а также прочной и пористой структурой, обеспечивающей максимальную степень выщелачивания полезных компонентов и минимальную степень разложения C_2S с получением шлама после выщелачивания, легко отделяемого и промываемого от алюминатного раствора.

Автором в собственных исследованиях³ впервые была установлена взаимосвязь величины вторичных потерь глинозема и степени дефектности структур α' - и β -модификаций двухкальциевого силиката, содержащихся в нефелиновом спеке [16, 17]. Также теоретически обосновано влияние условий термообработки нефелинового спека на формирование β -модификации

двухкальциевого силиката, устойчивой к взаимодействию с алюминатно-щелочными растворами: скорость охлаждения спека, оптимальная его температура на выходе из печи и выдержка при определенной температуре. Кроме того, были установлены корреляционные зависимости извлечения глинозема ($E_{Al_2O_3}$) и щелочи ($(Na,K)_2O$ (E_{R_2O})) в раствор при их выщелачивании из нефелинового спека от содержания спекообразующих фаз [18].

В результате лабораторных испытаний автором были определены условия термообработки для полиморфного перехода « $\alpha \rightarrow \beta$ -двухкальциевый силикат»: скорость охлаждения спека в интервале 1250–1000°C – не более 20°C/мин, оптимальная его температура на выходе из печи – 1000°C; выдержка – по 30 мин при 1160°C и 680–620°C³.

С помощью программного комплекса ANSYS CFX разработана компьютерная модель тепловой работы печи спекания, позволяющая оценить влияние основных режимов работы печи (расхода воздуха от 25100 до 36300 м³/ч, диапазона изменения среднего диаметра частиц каменного

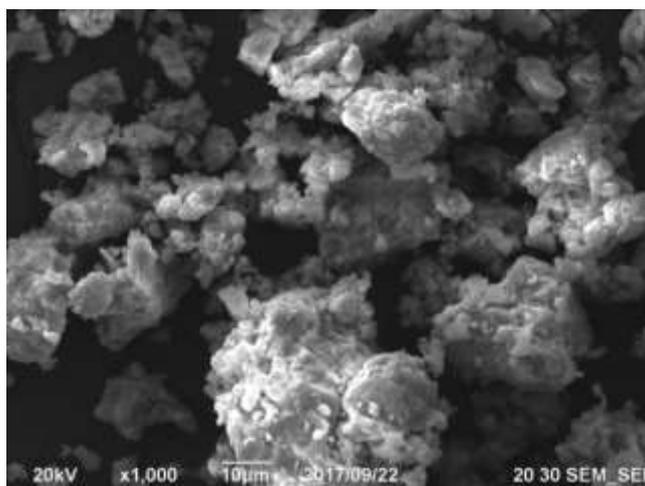


Рис. 2. Общий вид образца нефелинового спека (сканирующая электронная микроскопия на растровом электронном микроскопе с ионной пушкой JEOL JIB-Z450 при увеличении 1000х)

Fig. 2. General view of a nepheline cake sample (SEM on a scanning electron microscope with an ion gun JEOL JIB-Z450 at 100x magnification)

³Александров А.В. Повышение эффективности производства глинозема на основе формирования оптимального фазового состава нефелинового спека: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Иркутск, 2017. 186 с.



угля от 57 до 93 мкм) и модернизации ее конструктивных элементов (изменения диаметра топливной форсунки с 0,39 до 0,41 м и увеличения ее длины с 1,5 до 5 м; установки дополнительного подпорного порога на выходе из печи высотой 0,5 м) на равномерность и скорость охлаждения материала [19].

Предложена усовершенствованная конструкция печи спекания с установкой в зоне охлаждения спирали длиной 3 м с направлением закрутки противоположно вращению печи, позволяющей обеспечить требуемую скорость охлаждения нефелинового спека [20].

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НЕФЕЛИНОВЫХ СПЕКОВ

Для определения оптимальных условий охлаждения нефелиновых спеков была проведена серия лабораторных исследований.

Эксперименты проводились с использованием лабораторной муфельной печи SNOL 6,7/1300 производства АВ «UMEGA» (Литва). Химический состав проб материалов анализировался на рентгеновском спектрометре Simultix 13. Для определения фазового состава спеков рентгенодифракционным методом анализа (РДА) использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-6 (Россия). Сушка материалов производилась в сушильном шкафу FD 53 фирмы «Binder» (Германия).

Для исследования использовали промышленной образец известняково-нефелино-содовой шихты, предварительно

высушенный при температуре 150°C в сушильном шкафу с целью удаления внешней влаги. Химический состав готовой шихты приведен в табл. 1.

Эксперименты проводились в два этапа: на первом были проведены 4 опыта, в которых пробы спека (имеющие одинаковый химический состав) охлаждались в температурном интервале 1250–25°C с различными скоростями. Температура спека контролировалась в непрерывном режиме с помощью дополнительно установленной термопары, подсоединенной к образцам спека. Условия спекания шихт: скорость нагрева навески шихты – 10,4°C/мин, выдержка при температуре 1250°C – 15 мин. Результаты РДА образцов спеков приведены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, наблюдается прямая зависимость между содержанием β -C₂S и скоростью охлаждения (V). Влияние скорости охлаждения на содержание α' -C₂S в спеке носит обратный характер. По данным РДА не отмечено изменений качественного и количественного состава по другим фазам (алюминат натрия, феррит кальция CaO·Fe₂O₃, карнегиит Na₂O·Al₂O₃·2SiO₂), составляющих структуру спека. Это указывает на то, что при охлаждении происходит развитие только твердофазных реакций перекристаллизации C₂S.

Сравнивая фазовые составы образцов спеков, можно сделать вывод, что при снижении скорости охлаждения до 2°C/мин происходит рост содержания β -C₂S до максимального уровня за счет более полного перехода C₂S из α' - в β -форму. Таким образом, при одинаковом химическом составе

Таблица 1

Химический состав шихты

Table 1

Chemical composition of charge

Содержание, % масс.								
ППП*	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Проч.
26,41	11,58	2,19	16,81	32,39	0,98	6,44	2,24	0,96

* потери при прокаливании

Таблица 2

Изменение фазового состава спеков при охлаждении

Table 2

Cake phase composition variation upon cooling

№ п/п	Скорость охлаждения спеков, °С/мин	Содержание, %	
		α' -C ₂ S	β -C ₂ S
1	2	2	68
2	~ 25	15	55
3	~ 100	35	35
4	~ 1000	60	10

исходного материала возможна избирательная стабилизация: α' - либо β -C₂S.

Принимая во внимание, что термическая стабилизация высокотемпературных форм C₂S, синтезированного из химически чистых материалов, невозможна, полученный результат показывает ограниченное влияние примесей на переход α' → β -C₂S при изменении скорости охлаждения. На это также указывает и отсутствие γ -C₂S в полученных спеках. Стабилизация β -C₂S примесями затрудняет полиморфный переход в γ -модификацию двухкальциевого силиката.

На следующем этапе исследований была определена температура, ниже которой влияние наличия примесей на процесс перехода α' → β -C₂S существенно ослабевает.

Условия спекания шихт: скорость нагрева навески шихты – 10,4°С/мин, выдержка при температуре 1250°С – 15 мин. Охлаждение спеков в интервале 1250–600°С производилось в лабораторной печи с различными скоростями, °С/мин, соответственно: 15, 20, 25, 85 и 200. В качестве базовой скорости была принята скорость 20°С/мин, т.к. с данной скоростью происходит охлаждение спека в промышленной печи, с шагом $\pm 5^\circ\text{C}$ были выбраны дополнительные скорости; значения скоростей 85°С/мин и 200°С/мин были выбраны для сравнительной оценки изменения фаз при высоких скоростях охлаждения. В процессе экспериментов при различных скоростях охлаждения в изучаемом температурном интервале с шагом 20–50°С производилась выемка спека из печи и погружение его в водный раствор этиленгликоля.

Для каждой температуры для всех режимов производилось отдельное спекание шихты (с соблюдением одинакового химического состава). Это было вызвано тем, что при каждой выемке спека из печи происходит нарушение стабильности температуры в ее внутреннем пространстве, а это ведет к изменению заданного режима охлаждения других проб спека, находящихся в печи. При проведении индивидуально спекания влияние данного фактора исключено. Из полученных зависимостей (рис. 3) видно характерное изменение наклона кривой, отражающей содержание α' -, β -C₂S в спеках при температуре 1000°С для всех скоростей охлаждения.

Из полученных зависимостей (см. рис. 3) видно, что наблюдается характерное изменение наклона кривой, отражающей содержание α' -, β -C₂S в спеках при температуре 1000°С для всех скоростей охлаждения. Так, при температурах 1250–1000°С при охлаждении со скоростью 20°С/мин содержание α' -модификации C₂S уменьшается на 62%, а при увеличении скорости до 200°С/мин – только на 47%. При этом охлаждение со скоростью 20°С/мин приводит к повышению содержания β -C₂S на 61%, изменение скорости до 200°С/мин увеличивает его содержание до 46%. Снижение скорости охлаждения до 15°С/мин не приводит к изменению содержания α' - и β -C₂S.

Таким образом, наблюдается пропорциональное изменение содержания полиморфных модификаций при изменении скорости охлаждения: рост содержания β -

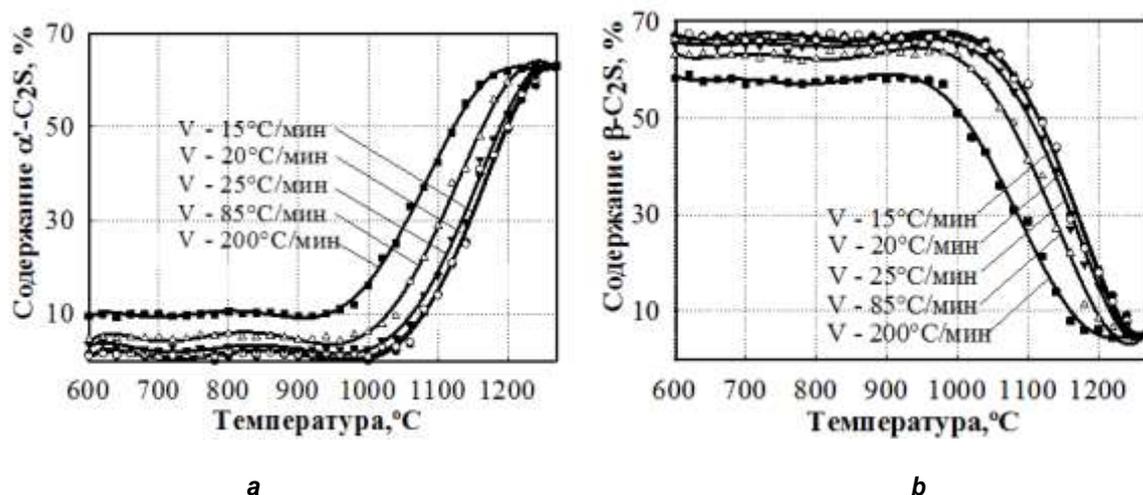


Рис. 3. Изменение содержания модификаций при охлаждении спеков с различными скоростями:
а – α - C_2S ; б – β - C_2S

Fig. 3. Variation of modification content when cooling sinters with different speeds: a – α - C_2S ; b – β - C_2S

C_2S идет за счет снижения содержания α - C_2S .

В дальнейшем при снижении температуры от 1000°C до 600°C не происходит изменения содержания α -, β - C_2S в спеках, колебания находятся в пределах погрешности измерения.

По уровню остаточного содержания α - C_2S в спеках можно сделать вывод о количестве «замороженной» α - C_2S с концентрацией примеси большей $c_{пр}$. (граничной концентрации). Так, при изменении скорости охлаждения от $15^\circ\text{C}/\text{мин}$ до $200^\circ\text{C}/\text{мин}$ количество α -модификации двухкальциевого силиката увеличивается от 1 до 10%.

Из полученных данных следует, что достаточно медленно охладить спек (со скоростью не более $15^\circ\text{C}/\text{мин}$) только до 1000°C , чтобы процесс перехода из α - в β - C_2S полностью завершился [16, 21].

3. РАСЧЕТ ОЖИДАЕМОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЛИНОЗЕМА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФЕЛИНОВ

Согласно проведенным лабораторным экспериментам установлено, что достаточно медленно охладить спек (со скоростью не более $20^\circ\text{C}/\text{мин}$) только до

1000°C , чтобы процесс перехода из α - в β - C_2S завершился; содержание в спеке α - C_2S при этом уменьшается в среднем до 1%.

Для определения степени $E_{Al_2O_3}$ и E_{R_2O} (по химическому анализу спеков и шламов) было проведено технологическое выщелачивание полученных спеченных продуктов по методике [22]. Обработкой экспериментальных данных охлаждения спеков в интервале температур 1250 – 1000°C на содержание α - C_2S установлено, что снижение содержания данной модификации в спеке на каждый 1% приводит к повышению $E_{Al_2O_3}$ на 0,2%, рис. 4.

В условиях работы АГК повышение извлечения на 1% эквивалентно повышению выпуска глинозема на 1%.

Принимая во внимание, что содержание α - C_2S в промышленных нефелиновых спеках АГК составляет порядка 10%, снижение до 1% может обеспечить, согласно полученной зависимости (см. рис. 4), повышение извлечения на 2%. Тогда дополнительный выпуск глинозема составит:

$$950000 \cdot 0,02 = 19000 \text{ т/год,}$$

где 950000 – плановый выпуск глинозема, т/год.

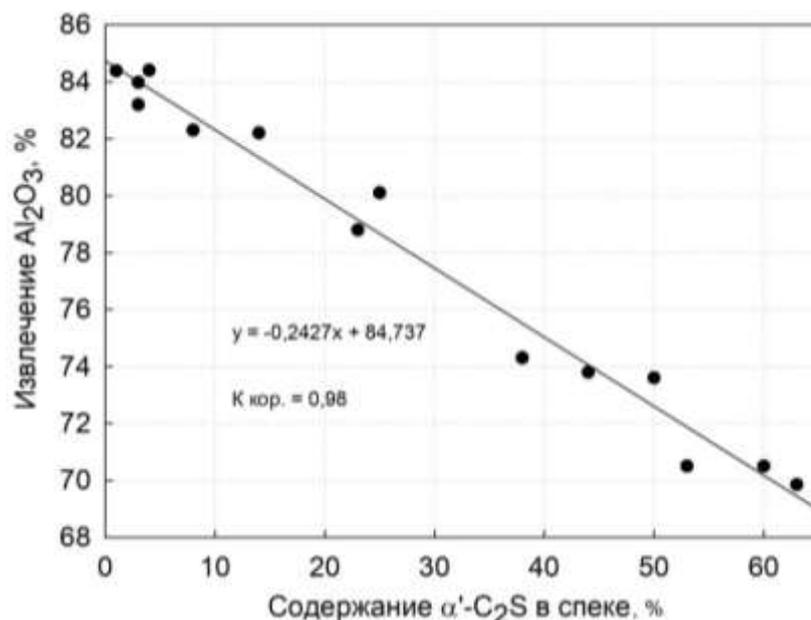


Рис. 4. Изменение извлечения глинозема от содержания α' -C₂S в спеке
 Fig. 4. Alumina extraction variation depending on α' -C₂S content in sinter

Дальнейший расчет экономической эффективности от получения дополнительных 19000 т глинозема в год проведем для АО «РУСАЛ Красноярск» (Красноярского алюминиевого завода), являющегося одним из основных потребителей данного вида сырья, выпускаемого АГК, для производства первичного алюминия. Данный алюминиевый завод производит первичный алюминий электролизом криолит-глиноземных расплавов на электролизерах с самообжигающимися анодами; принимаем для расчета годовой объем потребления глинозема АО «РУСАЛ Красноярск» равный 1933655 т.

Расчет произведем для двух вариантов.

Вариант 1: при условии, что 40% (1933655*0,4 = 773462 т) используемого глинозема на предприятии – производства АО «РУСАЛ Ачинск»; остальное закупается по 300 долл США за 1 т.

Вариант 2: принимаем, что потребление глинозема производства АО «РУСАЛ Ачинск» увеличится до 40,9% (773462 + 19000 = 792462 т/год или 792462/1933655*100 = 40,9%).

В табл. 4 приведена калькуляция себестоимости алюминия-сырца по варианту 1 с установкой электролизеров с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом на силу тока 167 кА, в табл. 5 представлена калькуляция себестоимости по варианту 2.

Для расчета принимаем:

– себестоимость глинозема собственного производства – 248,26 долл за 1 т (или 15757,06 руб. при курсе 63,47 руб./долл);

– стоимость закупаемого глинозема – 300 долл США за 1 т (или 19041 руб. при курсе 63,47 руб./долл).

Снижение себестоимости составит:

$$100 - ((76793,33/76737,5)*100) = 0,073\%.$$

Тогда годовой эффект для, например, АО «РУСАЛ Красноярск» (при годовом объеме производства первичного алюминия ~1000000 т в 2019 г.) составит:

$$(76793,33 - 76737,5)*1000000 = 5\,583\,000 \text{ руб.}$$



Таблица 4

Калькуляция себестоимости алюминия-сырца цеха электролиза
при потреблении глинозема по варианту 1

Table 4

Cost estimation of electrolysis shop raw aluminium
under option 1 of alumina consumption

Статьи затрат	Ед. изм.	На единицу продукции		
		Расходный коэффициент	Цена, руб.	Сумма, руб.
1. Сырье и основные материалы – глинозем, в т.ч.: производства АО «РУСАЛ Ачинск»; закупаемого глинозема	т/т	1,935 $1,935 \cdot 0,4 = 0,774$ $1,935 - 0,774 = 1,161$	$0,774 \cdot 15757,06 = 12195,96$ $1,161 \cdot 19041 = 22106,6$	12195,96 + 22106,6 = 34302,56
– фтористый алюминий	т/т	0,0223	30000	669
– анодная масса	т/т	0,508	11676	5931,4
– криолит смешанный (флотационный и регенерационный)	т/т	0,0153	12000	183,6
Итого по ст. 1		–	–	41086,56
2. Энергетические затраты – электроэнергия технологическая	тыс. кВт·ч/т	15,9	1957	31116,3
– сжатый воздух	тыс. нм ³ /т	0,792	260,82	206,57
Итого по ст. 2		–	–	31322,87
3. ФЗП* основных рабочих		–	–	1143,1
4. Отчисление на социальные нужды (30% + 1,1%)		–	–	355,5
5. Расходы на содержание и эксплуата- цию оборудования		–	–	1932,7
6. Цеховые расходы		–	–	952,6
Итого по пп. 3–6		–	–	4383,9
Цеховая себестоимость		–	–	76793,33

*фонд заработной платы

Таблица 5

Калькуляция себестоимости алюминия-сырца цеха электролиза
 при потреблении глинозема по варианту 2

Table 5

Cost estimation of electrolysis shop raw aluminium
 under option 2 of alumina consumption

Статьи затрат	Ед. изм.	На единицу продукции		
		Расходный коэффициент	Цена, руб.	Сумма, руб.
1. Сырье и основные материалы – глинозем в т.ч.: производства АО «РУСАЛ Ачинск»; закупаемого глинозема	т/т	1,935 $1,935 \cdot 0,409 = 0,791$ $1,935 - 0,791 = 1,144$	0,791*15757,06 = 12463,83 1,144*19041= 21782,9	12463,83 + 21782,9 = 34246,73
– фтористый алюминий	т/т	0,0223	30000	669
– анодная масса	т/т	0,508	11676	5931,4
– криолит смешанный (флота- ционный и регенерационный)	т/т	0,0153	12000	183,6
Итого по ст. 1	–	–	–	41030,73
2. Энергетические затраты – электроэнергия технологиче- ская	тыс. кВт·ч/т	15,9	1957	31116,3
– сжатый воздух	тыс.м ³ /т	0,792	260,82	206,57
Итого по ст. 2	–	–	–	31322,87
3. ФЗП основных рабочих	–	–	–	1143,1
4. Отчисление на социальные нужды (30% + 1,1%)	–	–	–	355,5
5. Расходы на содержание и эксплуата- цию оборудования	–	–	–	1932,7
6. Цеховые расходы	–	–	–	952,6
Итого по пп. 3–6	–	–	–	4383,9
Цеховая себестоимость	–	–	–	76737,5

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования по изучению охлаждения нефелинового спека с целью снижения вторичных потерь глинозема и увеличения его выпуска в условиях действующего производства – Ачинского глиноземного завода, являющегося основным поставщиком данного вида сырья для получения первичного алюминия на АО «РУСАЛ Красноярск».

Предложенные технические решения, направленные на повышение извлечения глинозема за счет оптимизации процесса спекания во вращающихся печах, позволят получать дополнительно до 19000 т глинозема в год.

Ожидаемый годовой эффект производства первичного алюминия на примере АО «РУСАЛ Красноярск» (при годовой производительности ~1000000 т) составит 55830 тыс. руб.



Библиографический список

1. Bagshaw A.N. The aluminium story. Bauxite to alumina: The bayer process. Perth, 2017. P. 1–29. [Электронный ресурс]. URL: <https://nzic.org.nz/app/uploads/2018/09/Bauxite-to-Alumina-Book-2018.pdf> (27.03.2019).
2. Evans K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. Vol. 2. Issue 4. P. 316–331. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>
3. Бричкин В.Н., Васильев В.В., Нагорная Е.А., Гуменюк А.М. Повышение качества боксита путем селективного измельчения // *Обогащение руд*. 2017. № 3. С. 3–9. <https://doi.org/10.17580/or.2017.03.01>
4. Дубовиков О.А., Бричкин В.Н., Николаева Н.В., Ромашёв А.О. Исследование процесса термомеханического обогащения боксита Среднего Тимана // *Обогащение руд*. 2014. № 4. С. 14–18.
5. Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Sizyakova E.V. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite // *Metallurgist*. 2016. Vol. 11. No. 59. P. 1135–1141. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0228-4>
6. Сизяков В.М., Корнеев В.И., Андреев В.В. Повышение качества глинозема и попутной продукции при переработке нефелинов. М.: *Металлургия*, 1986. 115 с.
7. Бричкин В.Н., Куртенок Р.В., Элдиб А.Б., Бормотов И.С. Состояние и пути развития сырьевой базы алюминия небокситных регионов // *Обогащение руд*. 2019. № 4. С. 31–37. <https://doi.org/10.17580/or.2019.04.06>
8. Официальный сайт ОК «РУСАЛ» [Электронный ресурс]. URL: <https://rusal.ru/en/> (27.03.2019).
9. Лайнер А.И., Еремин Н.И., Лайнер Ю.А., Певзнер И.З. Производство глинозема. М.: *Металлургия*, 1978. 344 с.
10. Арлюк Б.И., Лайнер Ю.А., Пивнев А.И. Комплексная переработка щелочного алюминийсодержащего сырья. М.: *Металлургия*, 1994. 384 с.
11. Пат. № 2602564, Российская Федерация, С01F 7/08, С01F 7/38, С01F 7/06. Способ подготовки шихты в глиноземном производстве / В.М. Сизяков, В.Н. Бричкин, Е.А. Алексеева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 26.11.2015; опубл. 20.11.2016. Бюл. № 32.
12. El-Deeb A.B.S., Brichkin V.N. Egyptian aluminum containing ores and prospects for their use in the production of aluminum // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2018. Vol. 9. No. 5. P. 722–731.
13. Bazhin V.Yu., Brichkin V.N., Sizyakov V.M., Cherkasova M.V. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. Issue. 1–2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
14. Килин Ю.А., Косолапов А.И. Повышение качества руды на Кия-Шалтырском нефелиновом карьере // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2003. № 1. С. 178–179.
15. Лапо В.Ф., Кравченко М.В. Оценка эффективности комплексной переработки сырья (на примере переработки нефелиновой руды с добавкой бокситов) // *Цветные металлы*. 2013. № 2. С. 52–57.
16. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V., Mineev G.G., Yakovleva A.A. Evaluation of the effect of nepheline the sinter on hydration activity during alumina production // *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. No. 11-12. P. 1016–1022. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0601-6>
17. Александров А.В., Яковлева А.А. Анализ причин вторичных потерь глинозема при выщелачивании нефелиновых спеков // *Вестник Иркутского государственного университета*. 2017. Т. 21. № 2. С. 137–145. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-2-137-145>
18. Александров А.В., Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Разработка аналитической методики оценки качества нефелинового спека // *Технология металлов*. 2017. № 7. С. 42–48.
19. Aleksandrov A.V., Aleksandrov V.V. Using CFD model of furnace for improvement of the quality of alumina-containing sinter // *Engineering Computations*. 2014. Vol. 31. Issue 1. P. 48–58.
20. Aleksandrov A.V., Aleksandrov V.V. Improving the Quality of Alumina-Containing Sinter Using Water-Cooled Furnace Shell // *Science of Sintering*. 2012. Vol. 44. Issue 3. P. 281–286. <https://doi.org/10.2298/SOS1203281A>
21. Пат. № 2521577, Российская Федерация, С01F 7/38. Способ получения алюминийсодержащего спека / А.В. Александров; заявитель и патентообладатель Александров Александр Валерьевич. Заявл. 23.10.2012; опубл. 27.06.2014. Бюл. № 18.
22. Пат. № 2023667, Российская Федерация, С01F 7/06. Способ моделирования агитационного выщелачивания нефелинового спека в лабораторных условиях / Б.И. Арлюк, Н.А. Зенькова, Т.В. Горбачева, Т.А. Кириллова; заявитель и патентообладатель ОАО «РУСАЛ ВАМИ». Заявл. 22.04.1991; опубл. 30.11.1994.

References

1. Bagshaw AN. *The aluminium story. Bauxite to alumina: The bayer process*. Perth; 2017, p. 1–29. Available from: <https://nzic.org.nz/app/uploads/2018/09/Bauxite-to-Alumina-Book-2018.pdf> [Accessed 27th March 2019].
2. Evans K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016;2(4):316–

331. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>
3. Brichkin VN, Vasilyev VV, Nagornaya EA, Gumenyuk AM. Bauxite grade improvement through selective grinding. *Obogashchenie rud.* 2017;3:3–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2017.03.01>
4. Dubovikov OA, Brichkin VN, Nikolayeva NV, Romashev AO. The Middle Timan bauxites thermochemical treatment process study. *Obogashchenie rud.* 2014;4:14–18. (In Russ.)
5. Sizyakov VM, Bazhin VYu, Sizyakova EV. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite. *Metallurgist.* 2016;11(59):1135–1141. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0228-4>
6. Sizyakov VM, Korneev VV, Andreev VI. *Improving quality of alumina and by-products under nepheline processing.* Moscow: Metallurgiya; 1986, 115 p. (In Russ.)
7. Brichkin VN, Kurtenkov RV, Aldib AB, Bormotov IS. The state and development trends of aluminum raw material base in non-bauxite regions. *Obogashchenie rud.* 2019;4:31–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2019.04.06>
8. RUSAL PLC official cite. Available from: <https://rusal.ru/en/> [Accessed 27th March 2019]. (In Russ.)
9. Lainer AI, Eremin NI, Lainer YuA, Pevzner IZ. *Alumina production.* Moscow: Metallurgiya; 1978, 344 p. (In Russ.)
10. Arlyuk BI, Lainer YuA, Pivnev AI. *Complex processing of aluminium containing alkaline material.* Moscow: Metallurgiya; 1994, 384 p. (In Russ.)
11. Sizyakov VM, Brichkin VN, Alekseeva EA. *Mixture preparation method in alumina production.* Patent RF, no. 2602564; 2016. (In Russ.)
12. El-Deeb ABS, Brichkin VN. Egyptian aluminum containing ores and prospects for their use in the production of aluminum. *International Journal of Scientific & Engineering Research.* 2018;9(5):722–731.
13. Bazhin VYu, Brichkin VN, Sizyakov VM, Cherkasova MV. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin. *Metallurgist.* 2017;61(1–2):147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
14. Kilin YuA, Kosolapov AI. Improving ore quality at the Kiya-Shaltyrsky nepheline open pit. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2003;1:178–179. (In Russ.)
15. Lapo VF, Kravchenko MV. Efficiency estimation of complex processing of raw materials (on the example of processing of nepheline ore with addition of bauxites). *Tsvetnye metally.* 2013;2:52–57. (In Russ.)
16. Aleksandrov AV, Nemchinova NV, Mineev GG, Yakovleva AA. Evaluation of the effect of nepheline the sinter on hydration activity during alumina production. *Metallurgist.* 2018;61(11–12):1016–1022. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0601-6>
17. Aleksandrov AV, Yakovleva AA. Analysis of causes for alumina secondary losses under nepheline cake leaching. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(2):137–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-2-137-145>
18. Aleksandrov AV, Nemchinova NV, Tyutrin AA. Development of analytical methodology for quality estimation of nepheline cake. *Tehnologia metallov.* 2017;7:42–48. (In Russ.)
19. Aleksandrov AV, Aleksandrov VV. Using CFD model of furnace for improvement of the quality of alumina-containing sinter. *Engineering Computations.* 2014;31(1):48–58.
20. Aleksandrov AV, Aleksandrov VV. Improving the quality of alumina-containing sinter using water-cooled furnace shell. *Science of Sintering.* 2012;44(3):281–286. <https://doi.org/10.2298/SOS1203281A>
21. Aleksandrov AV. *Production method of aluminum-containing cake.* Patent RF, no. 2521577; 2014. (In Russ.)
22. Arlyuk BI, Zenkova NA, Gorbacheva TV, Kirillova TA. *Modeling method of nepheline cake agitation leaching in laboratory conditions.* Patent RF, no. 2023667; 1994. (In Russ.)

Критерии авторства

Александров А.В., Немчинова Н.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authorship criteria

Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

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



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Александр Валерьевич,
кандидат технических наук,
директор Департамента технологии и технического
развития глиноземного производства,
ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,
662153, г. Ачинск, Южная промзона, 12/1, Россия;
✉ e-mail: modif@list.ru

Немчинова Нина Владимировна,
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой металлургии
цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: ninavn@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Aleksandrov,
Cand. Sci. (Eng.)
Director of the Department on Technology
and Technical
Development of Alumina Production,
RUSAL Engineering and Technology Center PLC,
12/1, Yuzhnaya promzona, Achinsk 662153, Russia;
✉ e-mail: modif@list.ru

Nina V. Nemchinova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: ninavn@yandex.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.365.2: 669.2/8

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>

Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа»

© К.В. Булатов, В.П. Жуков

ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

Резюме: Цель – актуальная проблема утилизации накопленных медьсодержащих промпродуктов обогащения. Определяли равновесное распределение Pb, Zn, S в системе «Cu–Zn промпродукт–CaCO₃–C–сульфидно-металлический продукт–газовая фаза (возгоны Pb, Zn)», соответствующей условиям прокалики медно-цинкового сульфидного промпродукта. Для решения поставленной задачи использовали метод термодинамического моделирования с применением пакета прикладных программ «HSC Chemistry 6» (Финляндия). В качестве исходных реагентов принимали сульфидный медно-цинковый промпродукт с содержанием, % масс.: Cu – 10,14; Zn – 22,70; Pb – 0,49; Fe – 21,00; S – 36,29; CaO – 0,51; SiO₂ – 2,49; Al₂O₃ – 5,47; кокс с содержанием – 80,0% масс. С и известняк – с 94,91% масс. CaCO₃. Также моделировалось равновесное распределение компонентов медно-цинкового промпродукта между исходными реагентами и продуктами прокалики в зависимости от температуры, характерной для твердофазных реакций. Выполнено термодинамическое моделирование твердофазного равновесного распределения компонентов изучаемой смеси при температуре 1150 °С. Показана возможность извлечения цинка в газовую фазу более 90%, металлизации железа и образования CaS. Твердый остаток после обесцинкования содержит, % масс.: CaS – 48,7; Fe_{мет} – 15,0; С – 3,4. И может быть использован для обеднения шлаков автогенной плавки в плавильном агрегате «Победа». Выполненное термодинамическое моделирование металлургических систем, в частности, прокалики медно-цинковых материалов в смеси с известняком и коксом, свидетельствует о возможности решения оптимизационных задач с применением информационных технологий. Технологическая эффективность применения сульфидно-металлического продукта доказана на примере электропечного обеднения конвертерных шлаков состава, % масс.: Cu – 3,75; Zn – 6,64; Fe – 43,79; SiO₂ – 21,88. Достигнуто извлечение меди в штейн 96%, были получены штейн (>20% Cu) и отвальный шлак (0,3% Cu). Расход сульфидно-металлического продукта при этом составил 15% от массы шлака.

Ключевые слова: металлургия меди, шлак, плавильный агрегат «Победа», отходящие газы, термодинамическое моделирование, медно-цинковый промпродукт

Информация о статье: Дата поступления 30 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 05 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Булатов К.В., Жуков В.П. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 421–433. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>

Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit

Konstantin V. Bulatov, Vladimir P. Zhukov

Uralmexhanobr OJSC, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The study is aimed at the urgent problem for disposal of accumulated copper-containing enrichment by-products. The equilibrium distribution of Pb, Zn and S was determined in the "Cu-Zn intermediate product – CaCO₃ – C – sulphide-metal product – gas phase (Pb, Zn sublimates)" system corresponding to the calcination conditions of the copper-zinc sulphide intermediate product. In order to solve this problem, the thermodynamic modelling method was applied using the HSC Chemistry 6 software application package (Finland). A copper-zinc sulphide intermediate product with the following composition (wt%) was taken as the initial reagents: Cu – 10.14, Zn – 22.70, Pb – 0.49, Fe – 21.00, S – 36.29,

CaO – 0.51, SiO₂ – 2.49, Al₂O₃ – 5.47, having 80.0 wt% C coke and 94.91 wt% CaCO₃ limestone. Additionally, the component equilibrium distribution in the copper-zinc intermediate product between the initial reagents and the products of calcination was simulated, depending on the temperature characteristic of solid-phase reactions. A thermodynamic modelling of the component solid-phase equilibrium distribution in the mixture under study at a temperature of 1150 °C was carried out. The possibility of 90% zinc extraction into the gas phase, metallisation of iron and the formation of CaS was demonstrated. Following dezincification, the solid residue was established to contain CaS, Fe_{met} and C in amount of 48.7, 15.0 and 3.4 wt%, respectively, with the possibility of application for autogenous smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. The performed thermodynamic modelling of metallurgical systems – in particular, the calcination of copper-zinc materials mixed with limestone and coke – demonstrated the possibility of solving optimisation problems using information technologies. The technological efficiency of a sulphide-metal product application is evidenced by the example of an electric furnace used to reduce the converter slag composed by Cu, Zn, Fe and SiO₂ in amounts of 3.75, 6.64, 43.79 and 21.88 wt%, respectively. The matte (> 20% Cu) with a copper recovery of 96% and dump slag (0.3% Cu) was obtained. The consumption of sulphide-metal product in this case comprised 15% of the slag weight.

Keywords: metallurgy of copper, slag, Pobeda smelting unit, flue gases, thermodynamic modeling, copper-zinc middling

Information about the article: Received December 30, 2019; accepted for publication March 05, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Bulatov KV, Zhukov VP. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):421–433. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>

1. ВВЕДЕНИЕ

Производство цветных металлов является неотъемлемой частью российской экономики и во многом определяет ее конкурентность на мировом рынке [1]. Технический прогресс в области цветной металлургии развивается по пути совершенствования действующего производства, решения вопросов по охране окружающей среды, ведения разработок по утилизации техногенных отходов и повышения качества производимой продукции [2–17].

Медеплавильное производство во всех странах-производителях меди характеризуется высоким выходом шлака, достигающим 5–6 т на 1 т металла, в которых находится 0,5–0,8% меди и других цветных металлов, содержащихся в рудном сырье [18]. Только в Уральском регионе накоплено свыше 110 млн т медных шлаков [19], где под отвалы использованы десятки тыс. гектаров земли. Наличие техногенных отходов неблагоприятно влияет на экологическую обстановку в местах их хранения.

На предприятиях Уральской горно-металлургической компании в различных отходах медеплавильного производства содержится > 860 тыс. т меди, > 2,5 млн т цинка, > 150 тыс. т свинца, ~ 100 т золота и

> 2000 т серебра [14]. Поэтому решение проблемы получения шлаков с низким содержанием меди и сопутствующих цветных металлов, утилизации накопленных медьсодержащих промпродуктов обогащения является актуальным.

В настоящее время на ООО «Медногорский медно-серный комбинат» освоена технология переработки полиметаллического концентрата состава, % масс.: Cu – 9–13; Zn – 11–21; Pb – 19–24; Fe – 6–20; S – 19–31 в плавильном агрегате «Победа» (ПАП) с переработкой оборотных шлаков в шахтной печи (рис. 1). Наличие ПАП в структуре медеплавильного производства, накопленный опыт его эксплуатации открывают перспективы для реконструкции аппаратурно-технологической схемы предприятия с переводом процесса обеднения шлаков и промпродуктов в высокопроизводительный агрегат барботажного типа.

2. УСТРОЙСТВО ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА «ПОБЕДА»

Модернизированный для плавки и фьюмингования ПАП отличается тем, что в конструкции аппарата дополнительно к боковому ряду предусмотрен еще один нижний ряд фурм (рис. 2). Комплексная про-



дувка расплава нижним и боковым дутьем интенсифицирует перемешивание расплава в объеме ванны, что приводит к увеличению скорости гетерогенных реакций с участием различных фаз реагентов обеднения (кокс, природный газ, сульфидизатор и пр.). При комбинированной обработке расплава боковыми и донными струями создаются благоприятные термодинамические и кинетические условия для возгонки летучих компонентов полиметаллических шлаков. ПАП оборудован смещенной к торцу горловиной для отвода газов и специальным отверстием диаметром 400 мм для загрузки твердых реагентов; футерован хромомagneзитовым кирпичом. Углевоздушную смесь предполагается вдувать в расплав шлака через боковые фурмы специальной конструкции, а пылеуголь, при-

родный газ с дутьем, обогащенным кислородом, через донные. Фурменный пояс оборудован системой водяного охлаждения под разрежением. Для заливки шлака ПАП поворачивают на 52° в сторону, противоположную линии фурм. Шлак заливают при помощи крана ковшами объемом 5 м³ периодически.

На торцевой крышке ПАП, близлежащей к загрузочному отверстию, расположено отверстие для выпуска в ковш. Выпуск отвального шлака производится с противоположного торца, расположенного ближе к горловине для выхода газов, через летку. По желобу шлак подается в ковш или на разливочные машины, где выгружается в бункер и охлаждается. Возможен слив отвального шлака в ковши через горловину.

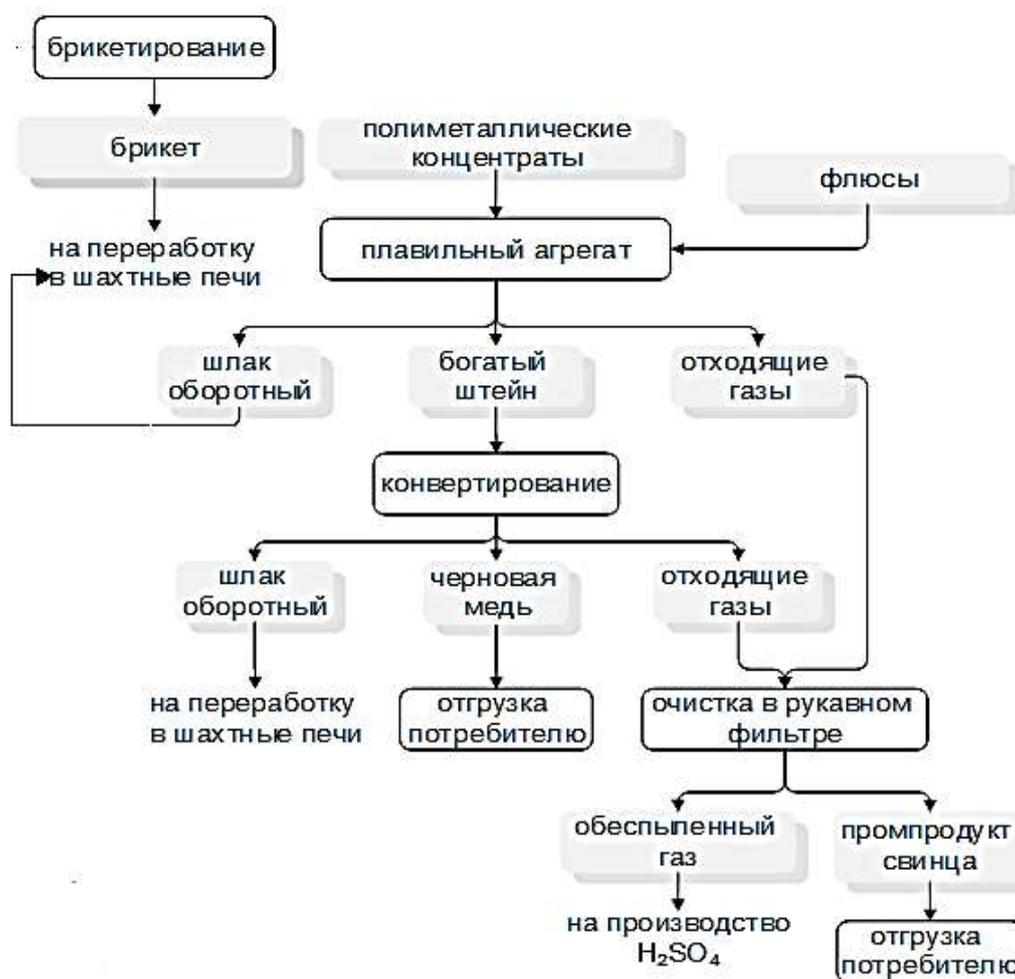


Рис. 1. Принципиальная схема переработки полиметаллических концентратов на ООО «Медногорский медно-серный комбинат»

Fig. 1. Schematic diagram of polymetallic concentrate processing at Mednogorsk copper-sulfur combine LLC

Газы из ПАП отводятся через горловину размером 2×3 м и далее через паросеparatorный напыльник поступают на охлаждение в установку испарительного охлаждения (УИО). Охлажденные газы выходят из УИО и направляются по газоходу в рукавный фильтр для окончательной очистки. Общий КПД газоочистной системы («напыльник – пылевая камера – УИО – рукавный фильтр») составляет более 99,9%.

Периодичность замены работающего в режиме плавки фурменного пояса ПАП – до 180 сут, продолжительность текущего ремонта – 14 сут. Капитальный ремонт проводится один раз в год. Некоторые технические характеристики ПАП приведены в табл. 1.

В связи с вышеизложенным, определенный интерес представляет использование фьюмингового агрегата ПАП в общей технологической схеме переработки трудноподдающихся селекции медно-цинковых сульфидных материалов (концентраты, промпродукты) и обеднения оборотных шлаков автогенной плавки коллективных и

полиметаллических концентратов.

3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ОБЕДНЕНИЯ ШЛАКОВ

Среди разнообразных способов обеднения шлаков одно из ведущих мест занимает восстановительно-сульфидирующая технология, позволяющая одновременно переводить летучие компоненты шлака и различных серосодержащих материалов в возгоны, а меди – в штейн [20, 21]. Процесс осуществляют с наведением бедного (10–25% меди) штейна для получения равновесного отвального шлака с низким содержанием (< 0,3–0,35%) меди. В качестве восстановителя используют кокс (мелочь), клинкер, поступающие с цинкпроизводящих заводов, содержащих до 20% свободного углерода, 10–20% Fe_{мет} и другие углеродистые материалы. В качестве сульфидизаторов применяют сернистые руды, пиритный концентрат, бедные по меди сульфидные полупродукты, которые совместно с углеродом образуют восстановительно-сульфидирующий комплекс

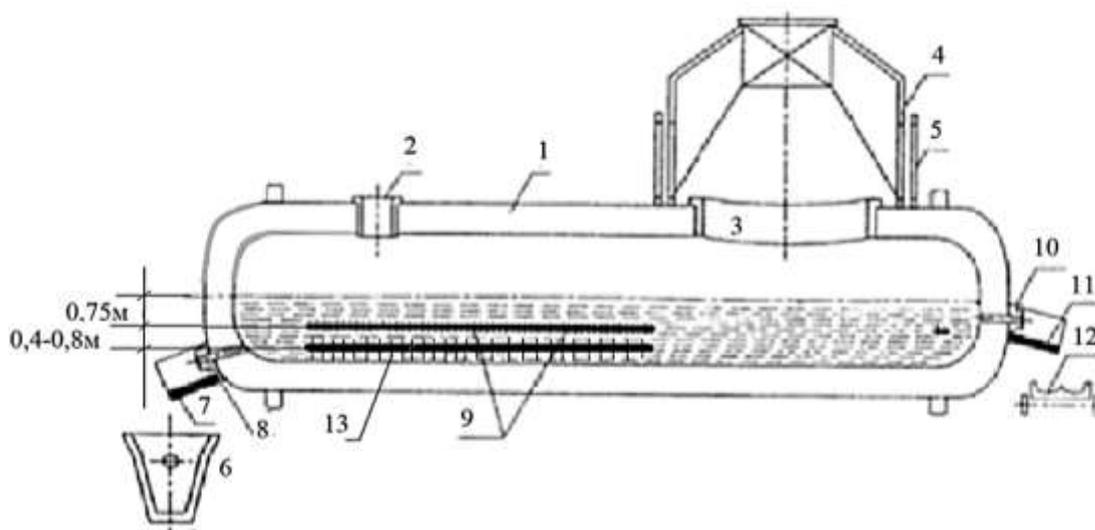
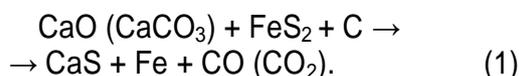


Рис. 2. Схема плавильного агрегата «Победа»: 1 – цилиндрическая поворотная печь; 2 – загрузочная горловина; 3 – газовая горловина; 4 – ковш для приема штейна; 5 – стационарная часть напыльника; 6 – поворотная часть напыльника; 7 – стационарный штейновый желоб; 8 – летка для выпуска обогащенного штейна; 9 – фурмы для подачи воздуха, обогащенного кислородом; 10 – летка для выпуска шлака; 11 – стационарный шлаковый желоб; 12 – шлакоразливочная машина или ковш; 13 – дополнительный ряд фурм

Fig. 2. Diagram of Pobeda smelting unit: 1 – cylinder rotary furnace; 2 – feed mouth; 3 – offgas mouth; 4 – matte ladle; 5 – stationary part of a dust cap; 6 – rotary part of a dust cap; 7 – stationary matte chute; 8 – concentrated matte taphole; 9 – tuyeres for oxygen enriched air supply; 10 – slag taphole; 11 – stationary slag chute; 12 – slag filling machine or ladle; 13 – additional row of tuyeres



(ВСК). Известно [22], что наиболее эффективные способы обработки шлаков ВСК получены на основе комплексных систем Fe–FeS₂–C, CaO–FeS₂–C, CaSO₄–Fe–FeS₂–C, которые в окучкованном и тщательно перемешанном виде загружают на поверхность шлаковой ванны. В этом случае при нагреве на откосах протекают твердофазные процессы:



А также реакции:

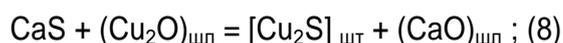
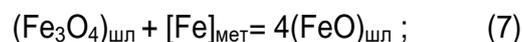
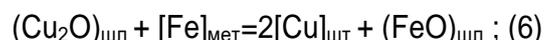


Таблица 1
Технические характеристики
плавильного агрегата «Победа»
Table 1

Technical characteristics
of Pobeda smelting unit

Параметр	Значение
Диаметр корпуса, м	3,95
Длина корпуса, м	16,5
Диаметр загрузочного отверстия, м	0,4
Длина горловины, м	3
Ширина горловины, м	2
Емкость агрегата по расплаву, т	140
Расход дутья, нм ³ /ч	0–40000
Расход кислорода, нм ³ /ч	0–2000
Содержание кислорода в дутье, % (об.)	22–27
Давление дутья в коллекторе, МПа	0,1–0,2
Общее число фурм, шт.	24
Диаметр фурмы, мм	47

В результате образуются эффективные восстановительно-сульфидирующие реагенты CaS, Fe_{мет}, участвующие в дальнейших восстановительно-обменных взаимодействиях:



Общей физико-химической основой, несмотря на разнообразие существующих технологий и аппаратного оформления процессов обеднения шлака, является наличие химических стадий восстановления магнетита различными реагентами (R):



А также сульфидирования оксида меди (I) шлака сульфидами MeS с переводом Cu₂O в извлекающую фазу штейна Cu₂S:



В этом случае остаточная концентрация меди в шлаке определяется термодинамическими условиями протекания реакции (II) и соответствует равновесному распределению металлов между фазами. В качестве объекта исследований рассматривается двухстадийная схема, включающая прокатку медно-цинкового промпродукта и фьюмингование обратного шлака автогенной плавки с применением сульфидно-металлического продукта (СМП). Исследование термодинамических закономерностей твердофазных взаимодействий может иметь значение не только применительно к прокатке, но и для технологии автогенной плавки с участием ВСК на стадии нагрева при плавлении шихтовых материалов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы определяли равновесное распределение Pb, Zn, S в системе «Cu–Zn промпродукт–CaCO₃–C–СМП–газовая фаза (возгоны Pb, Zn)», соответствующей условиям прокатки медно-цинкового сульфидного промпродукта. Для решения поставленной задачи использовали метод термодинамического моделирования с применением пакета прикладных программ HSC Chemistry 6 (Финляндия), разработанного компанией «Outokumpu», и входящие в него подпрограммы Reaction Equations, Equilibrium Calculation, подробно описанные в работе¹. В качестве исходных реагентов принимали сульфидный медно-цинковый промпродукт с содержанием, % масс.: Cu – 10,14; Zn – 22,70; Pb – 0,49; Fe – 21,00; S – 36,29; CaO – 0,51; SiO₂ – 2,49; Al₂O₃ – 5,47; кокс, % масс.: C – 80,00; SiO₂ – 11,20; CaO – 2,00; известняк – 6,80; CaCO₃ – 94,91; SiO₂ – 3,19; Al₂O₃ – 0,95; Fe₂O₃ – 0,95.

Первоначально определяли последовательность химических превращений с участием медно-цинкового промпродукта и возможные фазовые составляющие СМП, необходимые для последующего термодинамического моделирования равновесного распределения компонентов исходной шихты. В табл. 2 приведены твердофазные реакции, величины изменения свободной энергии Гиббса (ΔG° , кДж) и констант равновесия (K_p) при заданной температуре прокатки 1423 К.

Анализ представленных в табл. 2 данных показывает, что высшие и комплексные сульфиды меди, железа способны эффективно взаимодействовать с CaO и углеродом, о чем свидетельствуют величины отрицательных значений ΔG° и K_p (реакции (2), (3), (5)). При этом образуются Fe_{мет}, CaS, которые наряду с углеродом участвуют в восстановлении магнетита по

реакциям (9), (13), меди по (15), (18), а также возгонке PbS, Zn, Pb ((12), (19), (20)).

Маловероятно восстановление магнетита сульфидом железа по реакции (17), оксида цинка металлическим железом (14) и образование метасиликата цинка (24). Протекание данных реакций, а также образование основных фаз шлака (Fe₂SiO₄, CaO·Al₂O₃·2SiO₂, Al₂O₃·2SiO₂, ZnO, PbO, ZnFe₂O₄, ZnSiO₃, PbSiO₃, Pb₂SiO₄, Fe₃O₄, Al₂O₃, Cu₂O), штейна (FeS, Cu₂S, Cu, Fe, ZnS, PbS), газа, включая тонкую пыль (SO₂, SO₃, CO₂, CO, N₂, Zn, Pb, PbS) в большей степени следует ожидать при температуре фьюмингования. Учитывая наибольшее отрицательное ΔG° для химических превращений (2), (3), (10), (22), а также вероятные реакции (7), (8), (12), основными составляющими в конденсированной фазе СМП приняты CaS, CaO, Fe, FeS, Cu₂S, ZnS, PbS, C, SiO₂, а для восстановительной или нейтральной атмосферы – CO, CO₂, SO₂, Zn_r, PbS_r.

В дальнейшем нами моделировалось равновесное распределение компонентов медно-цинкового промпродукта между исходными реагентами и продуктами прокатки в зависимости от температуры, характерной для твердофазных реакций. Результаты моделирования в оригинальном графическом оформлении модуля программы HSC Chemistry 6 (Equilibrium Calculation) показаны на рис. 3–5.

Из рис. 3. видно, что восстановительная атмосфера в равновесном распределении компонентов газовой фазы наблюдается при температуре более 780°C и начало заметной отгонки цинка происходит в интервале температур 880–920°C, о чем свидетельствует восходящий характер кривой концентрации Zn. Сублимация свинца в форме PbS в газовую фазу происходит при более высокой температуре и характеризуется более низкой концентрацией в сравнении с парами цинка при постоянной температуре. Поэтому температура моделирования термодинамического

¹Агеев Н.Г., Набойченко С.С. Металлургические расчеты с использованием пакета прикладных программ HSC CHEMISTRY: учеб. пособ. Екатеринбург: ИПЦ УрФУ, 2016. 124 с.



состояния конденсированных фаз рассматриваемой системы должна быть не менее 1000°C.

На рис. 4, 5 представлены результаты моделирования по составу СМП и концентрации металлического цинка и сульфида свинца (вследствие низкой концентрации PbS на рис. 4, 5 отдельно не показан) в зависимости от массы углерода. Анализ данных рис. 2, 3 свидетельствует о том, что с увеличением количества восстановителя в системе возрастают концентрации CaS и Fe в СМП, что в целом соответ-

ствует термодинамическим данным, приведенным в таблице. Причем максимальное значение указанных фаз соответствует массе углерода, равной ~32–35 кг. До указанного значения происходит наибольшее снижение ZnS в СМП и закономерный перевод Zn в газовую фазу (см. рис. 3). Необходимо отметить, что на этом участке наблюдается нисходящий характер кривой концентрации CO₂, что свидетельствует о практически полном расходе CO в равновесном состоянии.

Таблица 2
Реакции и термодинамические величины (ΔG° , K_p) при температуре 1423 K (1150°C)

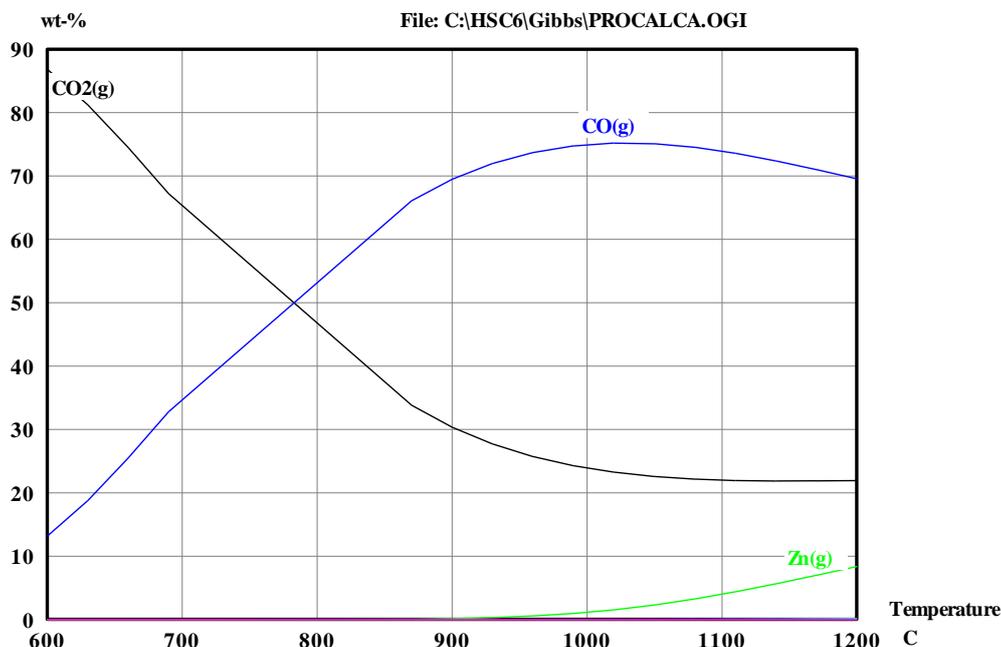
Table 2

Reactions and thermodynamic values (ΔG_0 , K_p) at the temperature of 1423 K (1150°C)

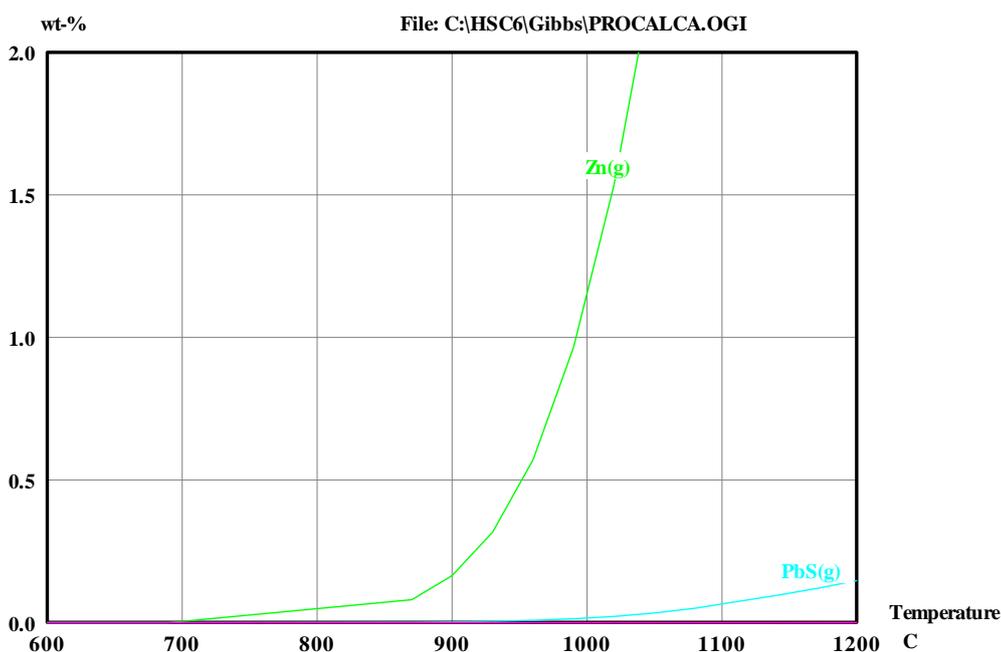
№	Реакция	$-\Delta G^\circ$	K_p
1	$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$	37,1	22,9
2	$\text{FeS}_2 + 2\text{CaO} + 2\text{C} = \text{Fe} + 2\text{CaS} + 2\text{CO}$	282,9	$2,42 \cdot 10^{10}$
3	$\text{CuFeS}_2 + 2\text{CaO} + 2\text{C} = \text{Fe} + \text{Cu} + 2\text{CaS} + 2\text{CO}$	177,9	$3,4 \cdot 10^6$
4	$\text{FeS} + \text{CaO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CaS} + \text{CO}$	76,7	$6,5 \cdot 10^2$
5	$\text{CuS} + \text{CaO} + \text{C} = \text{Cu} + \text{CaS} + \text{CO}$	132,7	$7,4 \cdot 10^4$
6	$\text{Cu}_2\text{S} + \text{CaO} + \text{C} = 2\text{Cu} + \text{CaS} + \text{CO}$	58,8	$1,4 \cdot 10^2$
7	$\text{ZnS} + \text{CaO} + \text{C} = \text{Zn}\uparrow + \text{CaS} + \text{CO}$	47,4	54,8
8	$\text{PbS} + \text{CaO} + \text{C} = \text{Pb}\uparrow + \text{CaS} + \text{CO}$	57,5	129
9	$\text{CaS} + 3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 5,5\text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3 + 4,5\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + \text{SO}_2$	68,4	324
10	$\text{CaS} + \text{Cu}_2\text{O} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{CaO}$	113,9	$1,5 \cdot 10^4$
11	$\text{CaS} + \text{ZnO} = \text{ZnS} + \text{CaO}$	11,2	2,6
12	$\text{CaS} + \text{PbO} = \text{CaO} + \text{PbS}\uparrow$	42,1	35,0
13	$\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{SiO}_2 = 2\text{Fe}_2\text{SiO}_4$	57,6	130
14	$\text{Fe} + \text{ZnO} = \text{FeO} + \text{Zn}\uparrow$	-7,5	0,53
15	$\text{Fe} + \text{Cu}_2\text{O} = 2\text{Cu} + \text{FeO}$	106,6	$8,3 \cdot 10^3$
16	$\text{Fe} + \text{PbO} = \text{Pb}\uparrow + \text{FeO}$	33,5	16,9
17	$\text{FeS} + 3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 5\text{SiO}_2 = 5\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + \text{SO}_2$	-2,5	0,8
18	$\text{C} + \text{Cu}_2\text{O} = 2\text{Cu} + \text{CO}$	177,8	$2,2 \cdot 10^6$
19	$\text{C} + \text{ZnO} = \text{Zn}\uparrow + \text{CO}$	58,6	141,7
20	$\text{C} + \text{PbO} = \text{Pb}\uparrow + \text{CO}$	99,6	$4,5 \cdot 10^3$
21	$\text{Cu}_2\text{O} + \text{CO} = 2\text{Cu} + \text{CO}_2$	94,7	$3,0 \cdot 10^3$
22	$\text{Cu}_2\text{O} + \text{FeS} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeO}$	124,5	$3,7 \cdot 10^4$
23	$\text{ZnO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{ZnFe}_2\text{O}_4$	29,7	12,3
24	$\text{ZnO} + \text{SiO}_2 = \text{ZnSiO}_3$	-2,4	0,8
25	$\text{PbO} + \text{SiO}_2 = \text{PbSiO}_4$	22,7	6,8
26	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	124,6	$1,2 \cdot 10^6$
27	$6\text{FeO} + \text{O}_2 = 2\text{Fe}_3\text{O}_4$	370,3	$1,1 \cdot 10^{18}$
28	$\text{ZnS} + 1,5\text{O}_2 = \text{ZnO} + \text{SO}_2$	334,2	$1,8 \cdot 10^{12}$
29	$\text{PbS} + 1,5\text{O}_2 = \text{PbO} + \text{SO}_2$	327,2	$8,4 \cdot 10^{15}$
30	$\text{Zn}_r + \text{CO}_2 = \text{ZnO} + \text{CO}$	19,5	5,2

Полученный в результате моделирования экстремальный вид функций состава СМП и газовой фазы позволил с помощью встроенного в программу модуля

пересчитать концентрационные зависимости на материальные потоки реагентов и оценить состав продуктов, а также коэффициент извлечения цинка в возгоны.



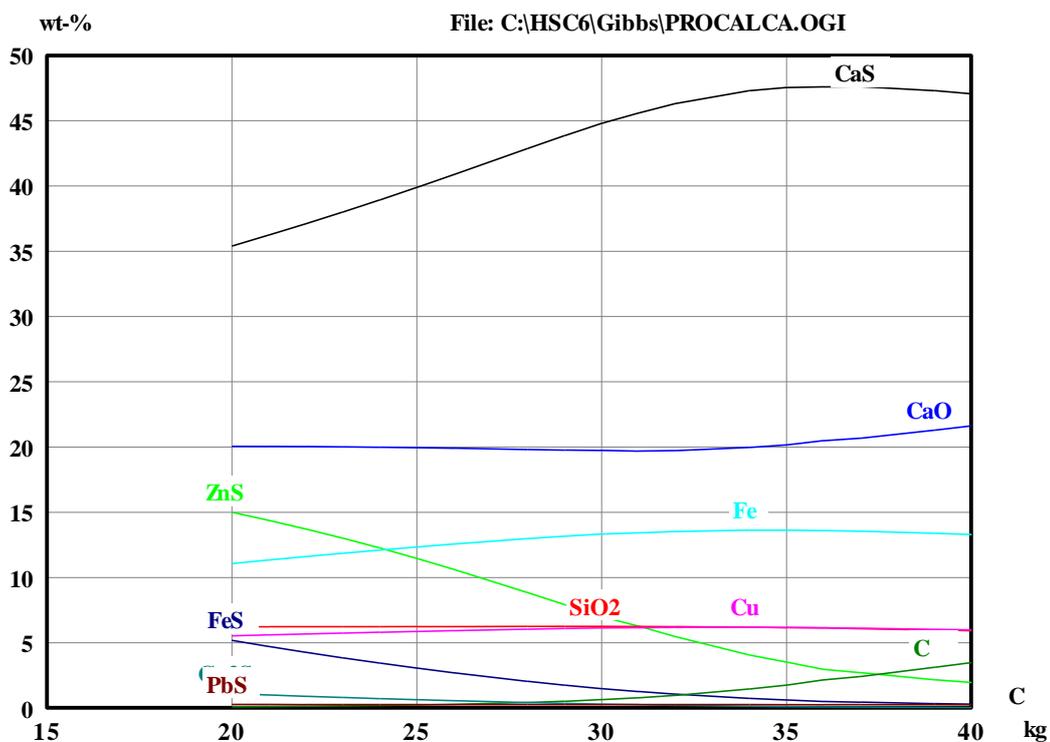
a



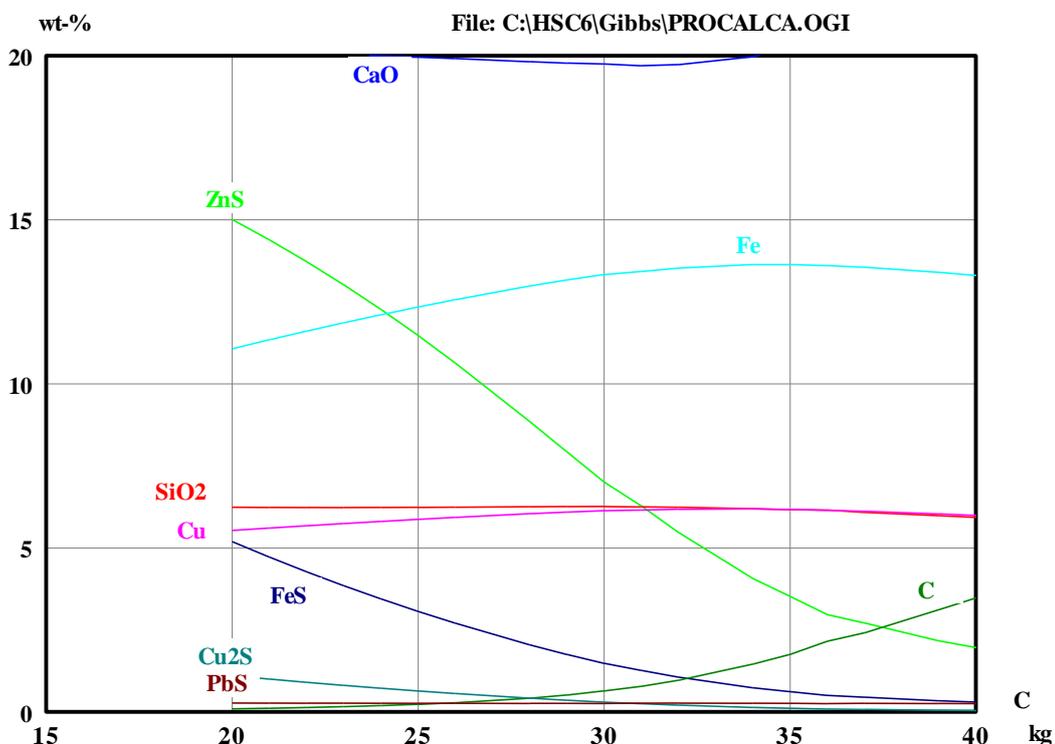
b

Рис. 3. Зависимость концентрации (% масс.) металлического цинка (а) и сульфида свинца (b) в газовой фазе от температуры прокали (°C) при соотношении массы Cu-Zn промпродукт: CaCO₃: C равном 1 : 1 : 0,25 (нижний рисунок при уменьшенном масштабе концентрации)

Fig. 3. Dependence of concentration (% wt.) of zinc metal (a) and lead sulfide (b) in a gas phase on the calcination temperature (°C) at a mass ratio of Cu-Zn middling product: CaCO₃: C equals to 1 : 1 : 0.25 (lower figure at a reduced scale of concentration)



a



b

Рис. 4. Изменение состава сульфидно-металлического продукта (% масс.) (а) в зависимости от массы углерода при $t = 1150^{\circ}\text{C}$ и соотношении Cu-Zn промпродукт: $\text{CaCO}_3 = 1:1$ (b) при меньшем масштабе концентраций

Fig. 4. Change in sulfide-metal product composition (% wt.) (a) depending on the mass of carbon at $t = 1150^{\circ}\text{C}$ and the ratio of Cu-Zn middling product: $\text{CaCO}_3 = 1:1$ (b) at the smaller scale of concentrations

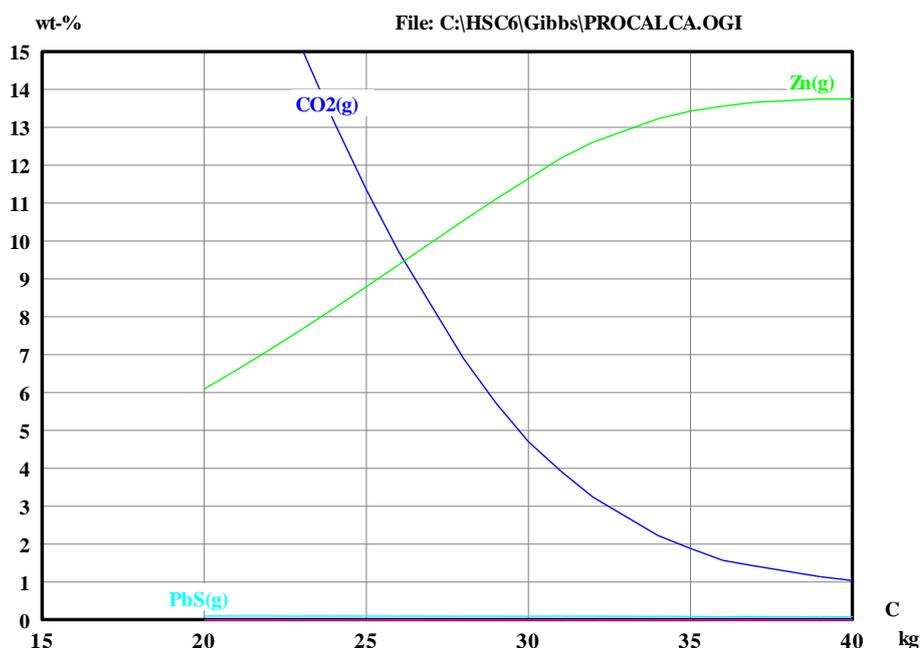


Рис. 5. Концентрация металлического цинка в газовой фазе при изменении массы углерода
 Fig. 5. Concentration of zinc metal in the gas phase when changing the mass of carbon

Таблица 3
 Состав продуктов прокалки

Table 3
 Composition of calcination products

Остаток (сульфидно- металлический продукт)	кг	%
CaO	3,48	2,61
CaS	65,00	48,68
Fe	20,10	15,05
FeS	3,83	2,87
Cu	9,41	7,05
Cu ₂ S	0,86	0,64
ZnS	17,60	13,18
PbS	0,46	0,35
C	4,58	3,43
SiO ₂	8,20	6,14
Итого	133,52	100,00
ГАЗ		
SO ₂	0,00	–
S ₂	0,00	–
CO	77,80	86,72
CO ₂	0,91	1,01
Zn	10,90	12,15
PbS	0,11	0,12
Итого	89,71	–
ВСЕГО	223,23	100,00

Ниже (табл. 3) представлен химический состав СМП и газовой фазы, соответствующий прокалке 100 кг Cu-Zn промпродукта, 100 кг CaCO₃ и 25 кг кокса.

На основании вышеприведенных данных был рассчитан коэффициент извлечения цинка в возгоны для максимального расхода углерода 35 кг, соответствующего оптимальному содержанию цинка в газе (см. рис. 3), который оказался равным 90,3%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное термодинамическое моделирование металлургических систем, в частности, прокалки медно-цинковых материалов в смеси с известняком и коксом, свидетельствует о возможности решения оптимизационных задач с применением информационных технологий на примере программы HSC Chemistry 6 и оценки возможных технико-экономических показателей производства.

Технологическая эффективность применения СМП доказана [21] на примере электропечного обеднения конвертерных шлаков состава, % масс.: 3,75 Cu; 6,64 Zn;



43,79 Fe; 21,88 SiO₂. Достигнуто извлечение меди в штейн 96%, были получены штейн (>20% Cu) и отвальный шлак (0,3% Cu). Расход СМП при этом составил 15% от

массы шлака. Следует предполагать, что аналогичные задачи могут быть также решены с использованием агрегата ПАП.

Библиографический список

1. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи российского металлургического комплекса // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
2. Харченко Е.М., Ульева Г.А., Егорова Т.Г., Рахимбеков С.С. Переработка шлаков медеплавильного производства // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 7. Ч. 1. С. 30–33. [Электронный ресурс]. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6954> (15.09.2019).
3. Котельникова А.Л. Исследование подвижности загрязняющих веществ при кислотном выщелачивании хвостов переработки медеплавильных шлаков // Инженерная экология. 2006. № 1. С. 54–62.
4. Dong Joon Min, Tsukihashi F. Recent advances in understanding physical properties of metallurgical slags // Metals and Materials International. 2017. Vol. 23. Issue 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6750-5>
5. Sarfo Prince, Young Jamie, Ma Guojun, Young Courtney. Characterization and Recovery of Valuables from Waste Copper Smelting Slag // Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (Berlin, 1st January 2016). Berlin: Springer, Cham, 2016. P. 889–898. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_95
6. Davenport W.G., King M.J., Schlesinger M.E., Biswas A.K. Extractive Metallurgy of Copper. London: Oxford, Pergamon, 2002. 452 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-0444029-3> (12.05.2019).
7. Шнеерсон Я.М., Иванова Н.Ф. Применение автоклавных методов для рафинирования труднообогатимых медных полиметаллических концентратов // Цветные металлы. 2003. № 7. С. 63–67.
8. Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. Особенности вещественного состава и перспективы использования отходов вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков // Литосфера. 2018. Т. 18. № 1. С. 133–139.
9. Комков А.А., Камкин Р.И. Поведение меди и примесей при продувке медеплавильных шлаков газовой смесью CO–CO₂ // Цветные металлы. 2011. № 6. С. 26–31.
10. Coursol P., Valencia C.N., Mackey V.P., Bell S., Davis B. Minimization of Copper Losses in Copper Smelting Slag During Electric Furnace Treatment // JOM. 2012. Vol. 64. No. 11. P. 1305–1313. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0454-6>
11. Лукавый С.Л., Федоров А.Н., Хабиев М.П., Хабиев Р.П., Мин М.Г. Исследование динамической вязкости высокомедистых шлаковых расплавов // Цветные металлы. 2012. № 2. С. 32–35.
12. Жмурова В.В., Немчинова Н.В., Васильев А.А. Гидрохимическая очистка от меди и свинца золото-содержащих катодных осадков // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 64–74. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>
13. Взородов С.А., Ключников А.М. Разработка технологии переработки медных отходов, содержащих драгоценные металлы // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 90–95. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.10>
14. Панышин А.М., Якорнов С.А., Скопов Г.В. Переработка техногенных отходов металлургических предприятий Уральской горно-металлургической компании // Техноген-2019: сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. С. 29–34.
15. Selivanov E.N., Popov A.I., Selmenskikh N.I., Lebed A.B. Oxide inclusions in copper during its fire refining // Non-ferrous Metals. 2013. No. 2. P. 19–22.
16. Жуков В.П., Холод С.И., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Возможность оптимизации состава шихты анодной плавки черновой меди методом математического планирования // Цветные металлы. 2017. № 9. С. 35–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.09.05>
17. Жуков В.П., Холод С.И., Лисиенко В.Г. Математическое описание окислительного рафинирования расплава черновой меди // Расплавы. 2018. С. 170–179.
18. Жуков В.П., Скопов Г.В., Холод С.И. Пирометаллургия меди. Екатеринбург: АХУ УрО РАН, 2016. 632 с.
19. Сабанова М.Н., Савин А.Г., Шадрюнова И.В., Орехова Н.Н. Типизация медных шлаков Уральского региона, практика и перспективы флотационной переработки на действующих обогатительных фабриках // Цветные металлы. 2013. № 8. С. 14–19.
20. Харитиди Г.П., Растяпин В.В., Тихонов А.И. Обезмеживание конвертерных шлаков продуктом обесцинкования медно-цинковых материалов // Цветные металлы. 1975. № 5. С. 24–27.
21. Харитиди Г.П., Худяков И.Ф., Векслер С.Ф., Скопов Г.В. Восстановление халькопирита твердым углеродом в присутствии оксида кальция // Известия АН СССР. Металлы. 1981. № 6. С. 21–27.
22. Купряков Ю.П. Шлаки медеплавильного производства и их переработка. М.: Металлургия, 1987. 201 с.

References

1. Sizykov VM, Vlasov AA, Bazhin VY. Strategy Tasks of the Russian Metallurgical Complex. *Tsvetnye Metally*. 2016;1:32–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
2. Kharchenko EM, Uleva GA, Egorova TG, Rakhimbekov SS. The Copper Smelting Slag Recycling Production. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* = International Journal of Applied and Fundamental Research. 2015;7(1):30–33. (In Russ.) Available from: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6954> [Accessed 15th September 2019].
3. Kotelnikov AL. A Study of Contaminants Mobility at Acid Leaching of Tailings from Copper-Smelting Slags. *Inzhenernaya ekologiya* = Engineering Ecology. 2006;1:54–62. (In Russ.)
4. Dong Joon Min, Tsukihashi F. Recent Advances in Understanding Physical Properties of Metallurgical Slags. *Metals and Materials International*. 2017;23(1):1–19. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6750-5>
5. Sarfo Prince, Young Jamie, Ma Guojun, Young Courtney A. Characterization and Recovery of Valuables from Waste Copper Smelting Slag. In: *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts* (Berlin, 1st January). Berlin: Springer, Cham, 2016. P. 889–898. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_95
6. Davenport WG, King MJ, Schlesinger ME, Biswas AK. *Extractive Metallurgy of Copper*. London: Oxford, Pergamon; 2002. 452 p. Available from: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> [Accessed 12th May 2019].
7. Schneerson YaM, Ivanova NF. Use of High Pressure Steam Methods for Refining Refractory Polymetallic Copper Concentrates. *Tsvetnye Metally*. 2003;7:63–67. (In Russ.)
8. Kotelnikova A, Ryabinin VF. The Composition Features and Perspective of Use for the Copper Slag Recycling Waste. *Litosfera* = Lithosphere. 2018;18(1):133–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139>
9. Komkov AA, Kamkin RI. Behaviors of Copper and Impurity Elements during Expulsion Copper Melt Slags with CO-CO₂ Gas Mixture. *Tsvetnye Metally*. 2011;6:26–31. (In Russ.)
10. Coursol P, Valencia CN, Mackey VP, Bell S, Davis B. Minimization of Copper Losses in Copper Smelting Slag during Electric Furnace Treatment. *JOM*. 2012; 64(11):1305–1313. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0454-6>
11. Lukavy SL, Fedorov AN, Habiev MP, Abiev RP, Min MG. Studying Dynamic Viscosity of High-Copper Slag Melts. *Tsvetnye Metally*. 2012;2:32–35. (In Russ.)
12. Zhmurova VV, Nemchinova NV, Vasiliev AA. Hydrochemical Removal of Copper and Lead from Gold-Bearing Cathode Deposits. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:67–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>
13. Vzorongov SA, Klyushnikov AM. Development of Recycling Technology for Copper Wastes Containing Precious Metals. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:90–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.10>
14. Panjchin AM, Jakornov SA, Skopov GV. Processing of Technogenic Waste of Ural mining and Metallurgical Company Metallurgical Enterprises. In: *Technogen-2019: Proceedings of International Conference*. Yekaterinburg: Ural branch of the Russian Academy of Sciences; 2019, p. 29–34. (In Russ.)
15. Selivanov EN, Popov AI, Selmenskikh NI, Lebed AB. Oxide Inclusions in Copper during its Fire Refining. *Tsvetnye Metally*. 2013;2:19–22.
16. Zhukov VP, Kholod SI, Lisienko VG, Lapteva AV. Possibility to Optimize Charge Composition of Rough Copper Anode Smelting By Mathematical Planning. *Tsvetnye Metally*. 2017;9:35–38. (In Russ.)
17. Zhukov VP, Kholod SI, Lisienko VG. Mathematical Description of the Oxidative Refining of Molten Blister Copper. *Rasplavy* = Melts. 2018;170–179. (In Russ.)
18. Zhukov VP, Skopov GV, Kholod SI. *Pyrometallurgy of copper*. Ekaterinburg: Administrative and Economic Department of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences; 2016, 632 p. (In Russ.)
19. Sabanova MN, Savin AG, Shadrinova IV, Orekhova NN. Typification of Ural region Copper Slags, Practice and Prospects of Flotation Processing at Operating Concentration Plants. *Tsvetnye Metally*. 2013;8:14–19. (In Russ.)
20. Kharitidi GP, Rastyapin VV, Tikhonov AI. Decontamination of Converter Slags by Dezincing Product of Copper-Zinc Materials. *Tsvetnye Metally*. 1975;5:24–27. (In Russ.)
21. Kharitidi GP, Khudyakov IF, Wexler SF, Skopov GV. Chalcopyrite Reduction by Solid Carbon in the Presence of Calcium Oxide. *Izvestiia akademii nauk SSSR Metallurgy*. 1981;6:21–27. (In Russ.)
22. Kupryakov Yu.P. *Copper Smelting Slags and their Recycling*. Moscow: Metallurgiya; 1987, 201 p. (In Russ.)

Критерии авторства

Булатов К.В., Жуков В.П. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bulatov K.V., Zhukov V.P. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.



Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Булатов Константин Валерьевич,

кандидат технических наук,
генеральный директор,
ОАО «Уралмеханобр»,
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия;
e-mail: umbr@umbr.ru

Жуков Владимир Петрович,

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
ОАО «Уралмеханобр»,
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия;
✉ e-mail: zhukov.v.p@mail.ru

Conflict of interests

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin V. Bulatov,

Cand. Sci. (Eng.),
CEO,
Uralmekhanobr OJSC,
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia;
e-mail: umbr@umbr.ru

Vladimir P. Zhukov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher,
Uralmekhanobr OJSC,
87 Khokhryakov St., Ekaterinburg 620144, Russia;
✉ e-mail: zhukov.v.p@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.432+669.531

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-434-443>

Исследование процесса термического разложения окисленных и сульфидных руд Озерного месторождения

© П.А. Гуляшинов, И.Г. Антропова, А.Н. Гуляшинов

Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Цель работы – получение новых сведений о поведении окисленных и сульфидных руд Озерного месторождения при термическом разложении. Основной сырьевой базой свинцовой и цинковой промышленности являются комплексные полиметаллические свинцово-цинковые руды, обычно содержащие и другие полезные компоненты, такие как медь, серебро. В Российской Федерации и на мировом рынке сохраняется дефицит цинка и свинца. В этой связи освоение крупнейшего Озерного полиметаллического месторождения (Республика Бурятия) позволило бы полностью покрыть дефицит страны по цинку и частично снизить его по другим цветным металлам. Однако руды месторождения по минеральному и фазовому составам являются неоднородными и сложными, характеризуются увеличением доли труднообогатимых руд с более тонкой вкрапленностью сульфидных минералов и повышенным содержанием окисленных форм. Эффективность переработки тонковкрапленных сульфидных и окисленных свинцово-цинковых руд может быть достигнута новым методом, включающим комбинированные методы на основе парогазовой технологии, позволяющей в одном аппарате реализовать процессы селективного вскрытия и активирования сложных минеральных комплексов. Дифференциальный термический анализ проводился на приборе Netzsch STA 449 F1 Jupiter. Термограммы снимали в платиновом тигле, в атмосфере аргона и линейном нагреве до 850°C. По результатам проведенного термического анализа технологических проб руд Озерного месторождения установлено, что термическое разложение окисленной руды относительно потери массы происходит в два этапа (при 246–318°C – дегидратация гетита; выше 360°C – разложение карбонатов и плюмбозинита), а разложение сульфидной руды – в три (последовательное разложение различных карбонатов, термическая диссоциация пирита с образованием магнетита и выделением серы). Были определены тепловые эффекты реакций и температурные интервалы разложения основных соединений исследуемых образцов.

Ключевые слова: комплексные полиметаллические свинцово-цинковые руды, Озерное месторождение, термический анализ, сфалерит, галенит, свинец

Информация о статье: Дата поступления 10 января 2020 г.; дата принятия к печати 03 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Гуляшинов П.А., Антропова И.Г., Гуляшинов А.Н. Исследование процесса термического разложения окисленных и сульфидных руд Озерного месторождения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 434–443. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-434-443>

Thermal decomposition of oxidised and sulphide ores in the Ozernoye deposit

Pavel A. Gulyashinov, Inna G. Antropova, Anatoly N. Gulyashinov

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Abstract: This study seeks to obtain new information on the behaviour of oxidised and sulphide ores in the Ozernoye deposit during their thermal decomposition. Lead and zinc are produced from complex polymetallic lead-zinc ores containing other valuable components, such as copper and silver. The market demand for zinc and lead remains high both in Russia and globally. In this regard, the development of the Ozernoye polymetallic deposit (Republic of Buryatia, Russia) is of particular importance, since its resources can cover the domestic deficit in zinc and other non-ferrous metals. However, in terms of mineral and phase composition, the ores in this deposit are heterogeneous and complex, containing an increased fraction of refractory ores with finely disseminated sulphide minerals and a high content of oxidised forms. The required efficiency of processing finely disseminated sulphide and oxidised lead-zinc ores can be achieved by a new method on the basis of steam-gas technologies allowing the selective decomposing and activation of complex mineral assemblages in a single technological step. A differential thermal analysis was performed using a Netzsch STA 449 F1 Jupiter instrument. Thermograms were recorded in a platinum crucible under argon atmosphere and linear heating to

850°C. The conducted thermal analysis of technological ore samples from the Ozernoye deposit showed that, in terms of weight loss, the thermal decomposition of oxidised ores consists of two stages – goethite dehydration at 246–318°C and carbonate and plumbojarosite decomposition at 360°C and higher. However, the decomposition of sulphide ores undergoes three stages, i.e. a sequential decomposition of various carbonates and thermal dissociation of pyrite followed by the formation of magnetite and the reduction of sulphur. The thermal effects of the reactions and the temperature decomposition ranges of the main compounds in the studied samples were determined.

Keywords: complex polymetallic lead-zinc ores, Ozernoye field, thermal analysis, sphalerite, galena, lead

Information about the article: Received January 10, 2020; accepted for publication March 03, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Gulyashinov PA, Antropova IG, Gulyashinov AN. Thermal decomposition of oxidised and sulphide ores in the Ozernoye deposit. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):434–443. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-434-443>

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной сырьевой базой свинцовой и цинковой промышленности являются комплексные полиметаллические свинцово-цинковые руды, обычно они содержат и другие полезные компоненты, такие как медь, серебро. Руды, содержащие цинк, добываются и перерабатываются в цинковый концентрат в 42 странах мира, основное производство (более 51%) приходится на Китай, Перу и Австралию. Свинцовый концентрат производится почти в 40 странах мира. Лидерами отрасли являются Китай, Австралия, США, Перу и Мексика, производящие 78% мирового объема свинцового концентрата [1, 2].

В опубликованном в конце 2018 г. очередном отчете ILZSG (International Lead & Zinc Study Group – Международной группы изучения свинца и цинка) сообщается об ожидаемом сохранении в период 2019–2020 гг. дефицита на мировом рынке рафинированного цинка и свинца [3]. В этой связи освоение крупнейшего Озерного полиметаллического месторождения в Республике Бурятия позволило бы полностью покрыть дефицит страны по цинку и частично снизить его по другим цветным металлам [4–7].

Основным источником для получения свинца и цинка являются сульфидные руды, которые содержат галенит и сфалерит, а также пирит, халькопирит, арсенопи-

рит. Окисленные руды имеют второстепенное значение в качестве источника получения свинца и цинка и представляют собой железистые охры и баритовые сыпучки, содержащие церуссит, англезит, смитсонит, каламин, малахит¹.

В настоящее время проявляется повышенный интерес к переработке бедных руд и лежалых хвостов отработанных месторождений свинца и цинка. Разрабатываются способы переработки, которые основываются на флотационных методах обогащения с предварительной сульфидизацией оксидов свинца и цинка [8–11]. В литературном источнике [12] показан вариант применения полисульфида кальция в качестве сульфидизатора при флотационном обогащении окисленных свинецсодержащих руд.

Озерное свинцово-цинковое месторождение находится в Еравнинском районе Республики Бурятия в 160 км к северу от железнодорожной станции Могзон Транссибирской магистрали, в 60 км от райцентра Сосново-Озерское; данное месторождение входит в десятку цинковых месторождений в мире по объемам запасов и качеству руды.

В Байкальском институте природопользования СО РАН (г. Улан-Удэ) разработаны универсальные способы переработки окисленных свинцово-цинковых руд. Суть способов заключается в глубоком сульфидировании окисленных минералов

¹Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Утв. распоряжением МПР Российской Федерации № 37-р от 05.06.2007.



свинца и цинка в процессе их обжига с пиритным концентратом в атмосфере перегретого водяного пара на стадии подготовки к флотационному обогащению. При этом достигается степень сульфидирования свинца и цинка свыше 95% [13, 14].

Ранее авторами были проведены исследования по термодинамическому моделированию и кинетике процесса пиро-сульфидирования окисленных свинцово-цинковых руд [15, 16]. Для подтверждения ранее проведенных исследований и получения новых сведений по совместному обжигу тонковкрапленных сульфидных и окисленных минералов термическому разложению подвергали пробы окисленных и сульфидных руд Озерного месторождения.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись технологические пробы сульфидных и окисленных руд Озерного месторождения. Основными ценными компонентами окисленной пробы руды являются свинец (2,42%), серебро (до 100 г/т) и цинк (0,53%). Серебро распределяется по минералам аргентит (Ag_2S) и кераргирит (AgCl), которые в виде пленок обволакивают отдельные зерна окисленного галенита. Основными химическими составляющими руды являются оксиды кремния (37,3%), железа (29,2%) и алюминия (7,8%), за ними следуют оксиды магния (1,88%), кальция (0,87%), калия (2,2%), марганца (1,98%). Содержание серы в руде составляет 1,37%, а вредных примесей мышьяка – десятые и тысячные доли процента.

Установлено, что по минеральному составу руда в основном представлена кварцем (SiO_2), гетитом (FeOOH), плюмбозитом ($\text{PbFe}_6(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_4$), калиевым полевым шпатом $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ и гетеролитом (ZnMn_2O_4).

Основными рудными минералами сульфидной пробы являются пирит FeS_2 , сфалерит ZnS и галенит PbS (последний – в меньшем количестве). Породообразующие минералы представлены кварцем, ка-

лиевым полевым шпатом и карбонатами (сидерит FeCO_3 , доломит $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$).

Ценными компонентами в данных рудах являются цинк, свинец и серебро. Их средние содержания в сульфидной руде составляют: Zn – 6,7%; Pb – 1,2%; Ag – 34 г/т. Достаточно высокие содержания ценных компонентов позволяют ожидать при их промышленной переработке не менее низкие технико-экономические показатели.

Дифференциальный термический анализ (ДТА) проводился на приборе Netzsch STA 449 F1 Jupiter. Данный прибор характеризуется повышенной точностью измерения и широким диапазоном рабочих температур от 100 до 1400°C. Термограммы снимали в платиновом тигле, в атмосфере аргона, при нагреве 10°C в минуту до 850°C, масса образца составляла 20 мг. Во время анализа в автоматическом режиме регистрировались следующие показатели: температура нагрева (Т), масса навески образца (ТГ), изменение массы (ДСК), тепловые эффекты (в Дж/г). Конечные твердые продукты реакций определяли с помощью рентгеновского дифрактометра D8 ADVANCE. Данные исследования материалов проводились на оборудовании Центра коллективного пользования Бурятского научного центра СО РАН. Также проводился рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6510LV с микроанализатором INCA Energy 350, Oxford Instruments в Центре коллективного пользования «Прогресс» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

ДТА находит применение в аналитической и органической химии, а также в геологических изысканиях, как быстрый способ определения минералов в различных горных породах. Для проведения анализа требуется минимальное количество исследуемого материала. ДТА возможно использовать для изучения минерального

сырья как дополнительный вид исследования к стандартному химическому анализу [17]. Данный метод исследования успешно применялся и представлен в работе [18], которая посвящена обжигу оксида цинка с пиритом. Также в работе [19] описано применение ДТА для изучения термической стабильности соединений $ZnCl_2$, $ZnSO_4$ и ZnO . Ранее авторами работы проводились исследования по термическому разложению мышьяксодержащих руд и концентратов [20].

Полученные результаты ДТА образца окисленной руды показаны на рис. 1. В соответствии полученных кривых ТГ и ДСК видно, что нагрев образца до температур 246,0–318,4°C сопровождается разложением гетита $FeO(OH)$ на Fe_2O_3 и кристаллизацию воду, данная реакция протекает с потерей массы до 4,92% и эндотермическим эффектом -56,29 Дж/г. Также в интервале температур от 350°C до 800°C наблюдается незначительная потеря массы (око-

ло 2%). В данном интервале разложению подвергаются карбонаты, затем ступенчато, выше 700°C, пльмбоярозит с образованием оксидов свинца и железа.

После остывания образец руды был направлен на рентгенофазовый анализ (РФА). Конечными продуктами разложения окисленной пробы руды (при нагревании до 850°C) являются Fe_2O_3 и PbO .

На рис. 2 представлена термограмма разложения образца сульфидной руды Озерного месторождения. Согласно данным анализа установлено, что сульфидная руда диссоциирует в три этапа.

На первом этапе при температуре 514,2°C и потере массы до 4,25% происходит разложение сидерита с образованием смешанного оксида Fe_3O_4 с эндотермическим эффектом -30,39 Дж/г.

На втором этапе при температуре 581,4°C и незначительной потере массы происходит разложение карбоната магния с образованием оксида магния.

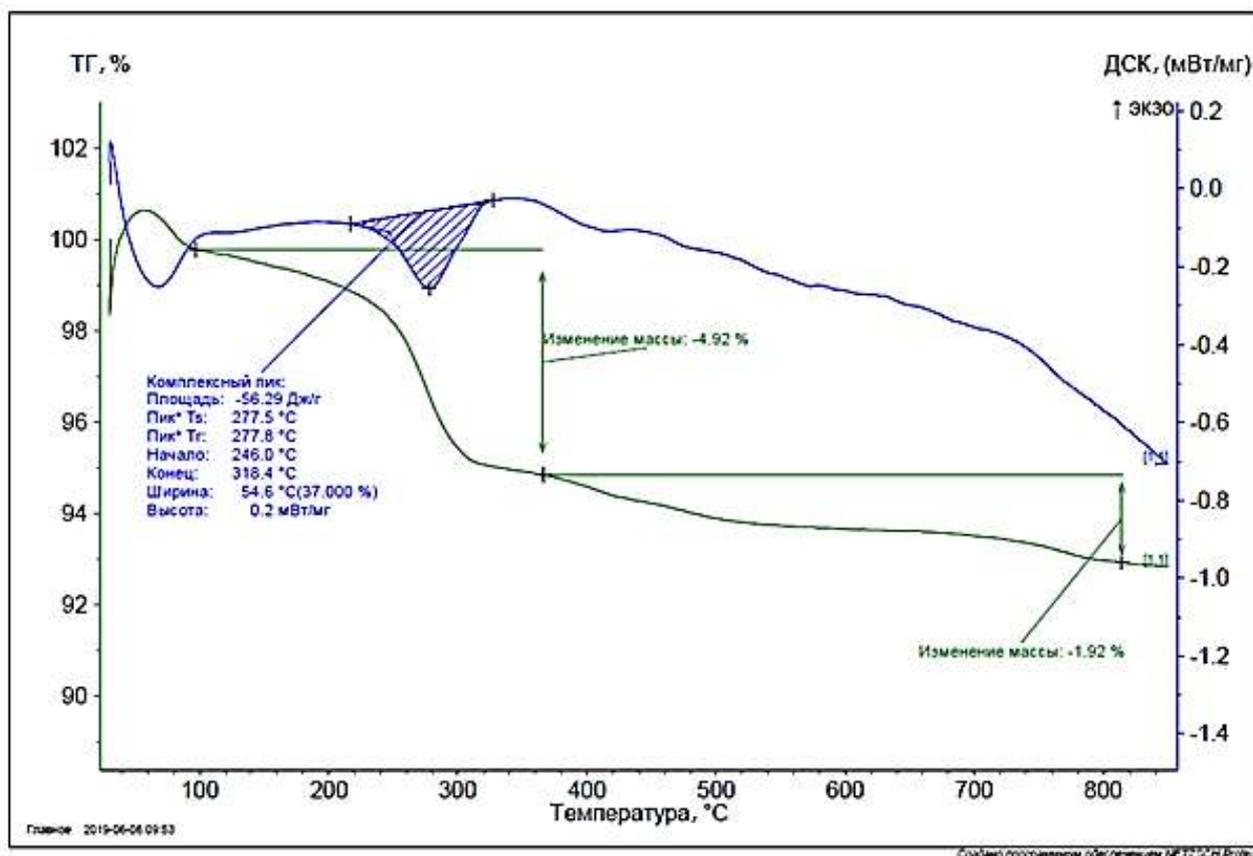


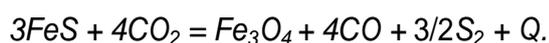
Рис. 1. Термограмма разложения окисленной руды Озерного месторождения
 Fig. 1. Thermogram of Ozernoe field oxidized ore decomposition



Наибольший интерес вызывает экзотермический пик (11,02 Дж/г) при температуре разложения 635,7–643,5°C. В этом диапазоне происходит термическая диссоциация пирита с выделением S° по реакции:



Далее сернистое железо реагирует с продуктом разложения карбонатных минералов – оксидом углерода с образованием магнетита:



Выделяющаяся сера в этих условиях испаряется, с чем связана потеря массы около 3,39%.

По данным РФА, материал после синхронного термического анализа (нагревание до 850°C) представлен Fe₃O₄, ZnS, SiO₂. Таким образом, при нагревании сульфидной пробы руды до 850°C происхо-

дит полное разложение карбонатных минералов с образованием оксидов, пирит в отсутствие кислорода воздуха полностью переходит магнетитовую форму за счет взаимодействия с оксидом углерода, а сульфид цинка в составе руды в этих условиях остается без изменения.

Было принято решение провести дополнительные лабораторные эксперименты по результатам ДТА проб окисленной и сульфидной руд Озерного месторождения по совместному обжигу смеси окисленной и сульфидной руд в атмосфере водяного пара.

Данные исследования по обжигу проводились на лабораторной установке в соотношении двух типов руд 1:1. Схема установки представлена на рис. 3. Эта установка состоит из четырех основных частей – электропечи, парогенератора, реактора и поглотителей газов. Температурный режим в печах регулируется микропроцессорным электронным терморегулятором МПРТ-22 и измеряется термопарами типа ХА.

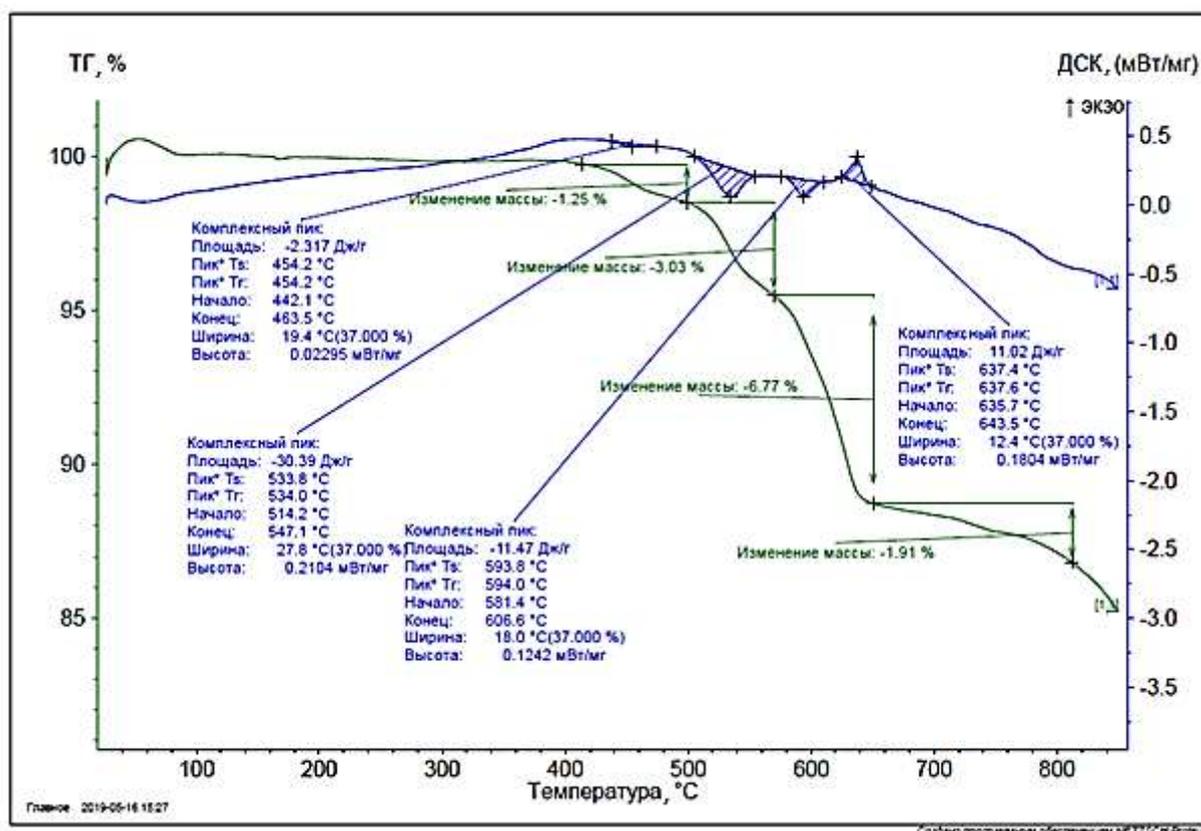


Рис. 2. Термограмма разложения сульфидной руды Озерного месторождения
Fig. 2. Thermogram of Ozernoe field sulfide ore decomposition

Реактор и парогенератор изготовлены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В парогенератор поступает холодная вода через ротаметр РМ-А. Особенностью данной установки является расположенная в нижней части реактора форсунка, через нее в реактор подается перегретый водяной пар из парогенератора. Верхняя часть реактора соединена с поглотителями газов.

Установка работает следующим образом: при достижении заданной температуры в реакторе и парогенераторе в нее

подается вода. После промывки системы парами воды в реактор загружается навеска исследуемого материала (шихты) массой 40 г. Температура обжига составляла 700°C при 30-минутной продолжительности обжига.

Полученные после обжига огарки были направлены на РФА. На рентгенограмме (рис. 4) видно, что конечными продуктами обжига смеси окисленной и сульфидной руд являются ZnS, PbS, Fe₃O₄ и SiO₂.

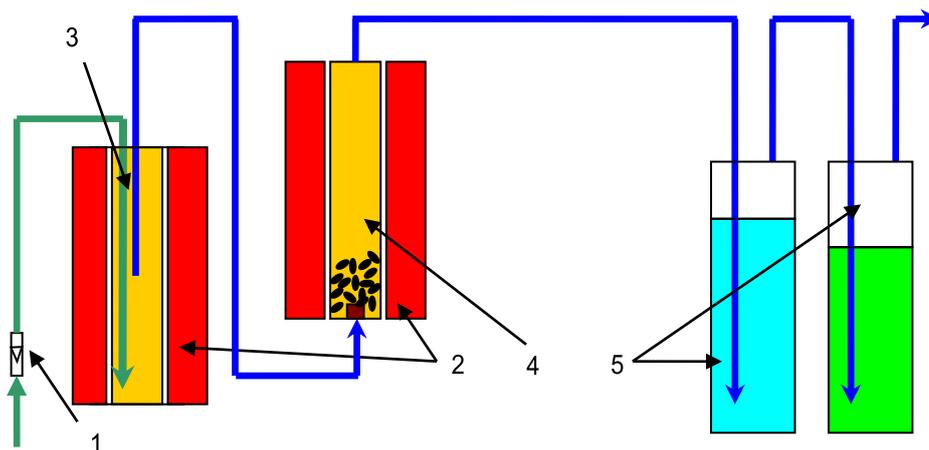


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки: 1 – ротаметр; 2 – электродуны; 3 – парогенератор; 4 – реактор; 5 – поглотители газов
Fig. 3. Schematic diagram of the laboratory installation: 1 – rotameter; 2 – electric furnaces; 3 – steam generator; 4 – reactor; 5 – gas absorbers

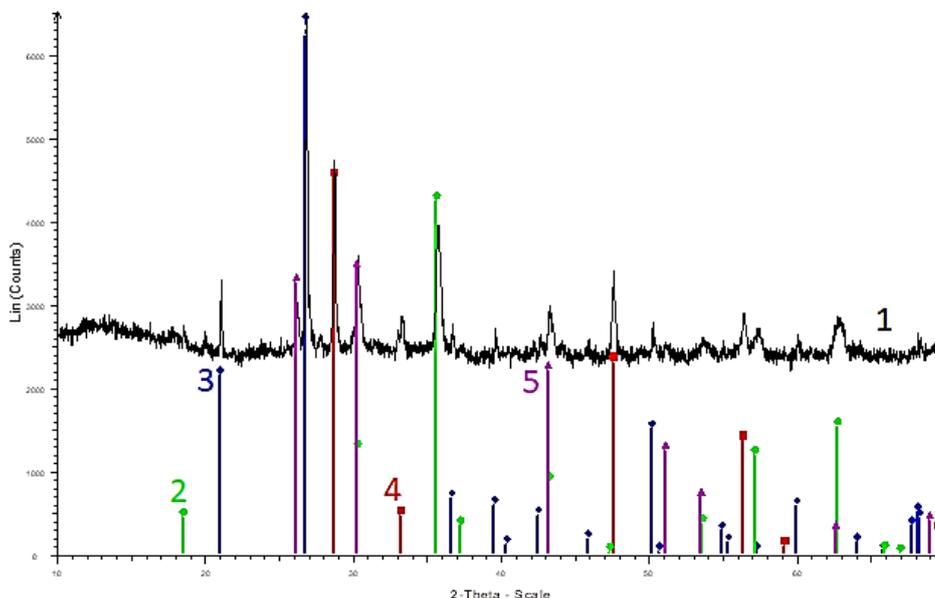
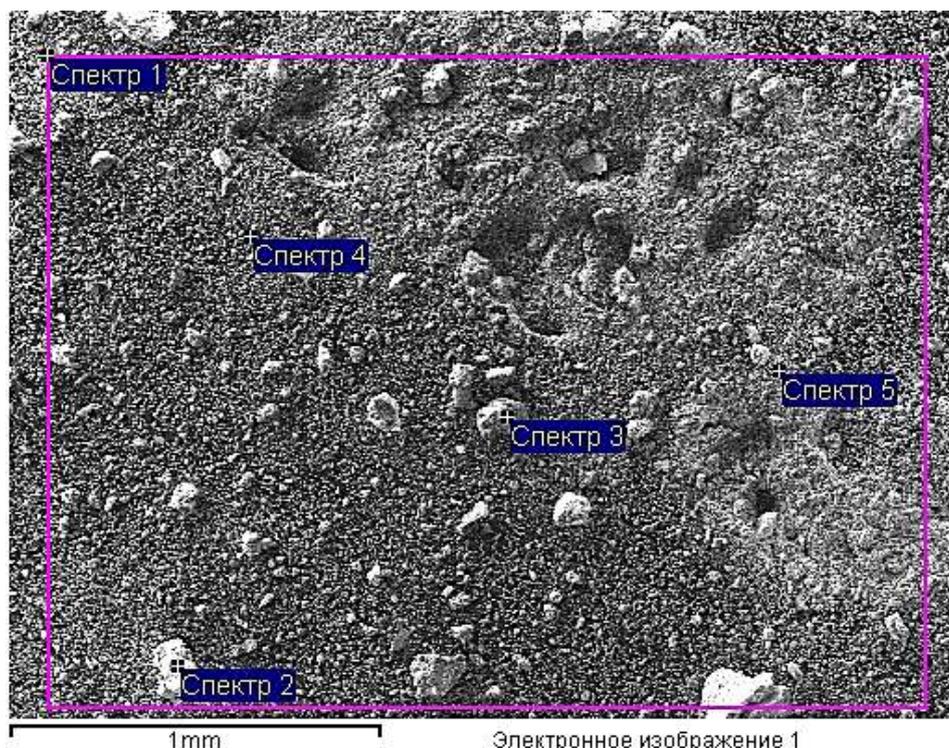


Рис. 4. Рентгенограмма (1) огарков: 2 – Fe₃O₄, 3 – SiO₂, 4 – ZnS, 5 – PbS
Fig. 4. XRD patterns (1) of calcines: 2 – Fe₃O₄, 3 – SiO₂, 4 – ZnS, 5 – PbS



Спектр	В ср.ат.	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Итого
Спектр 1	Да	41.25	1.02	5.19	10.79	9.91	2.24	1.44	0.41		19.21	1.08	7.48		100.00
Спектр 2	Да	59.21	0.13	1.05	29.11	4.11	0.33	0.03		0.23	4.40	0.27	1.13		100.00
Спектр 3	Да	30.72	0.11	3.32	28.45	12.42	3.33	0.34			18.86	0.91	1.52		100.00
Спектр 4	Да	26.77	0.83	4.01	6.47	22.05	1.78	0.53			28.23	0.85	8.49		100.00
Спектр 5	Да	39.37	1.09	5.74	8.64	7.56	2.40	0.84	0.29		20.61	1.07	4.95	7.44	100.00
Макс.		59.21	1.09	5.74	29.11	22.05	3.33	1.44	0.41	0.23	28.23	1.08	8.49	7.44	
Мин.		26.77	0.11	1.05	6.47	4.11	0.33	0.03	0.29	—	4.40	0.27	1.13	—	

Рис. 5. Спектрограмма огарка
Fig. 5. Cinder spectrogram

На рис. 5 показано электронное изображение огарков (результаты РСМА). По результатам рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов установлено, что при совместном обжиге смеси окисленной и сульфидной руд в атмосфере водяного пара при 700°C происходит пиросульфидирование окисленных минералов свинца и цинка, сульфиды свинца и цинка в составе исходной шихты остаются без изменений, а пирит окисляется с образованием магнетита.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получены новые сведения о термическом разложении окисленных и сульфидных руд Озерного месторождения, установлено, что окисленная

руда разлагается в два этапа: при 246–318°C – дегидратация гетита, а выше 360°C – разложение карбонатов и плюмбозита. Термическое разложение сульфидной руды происходит в три этапа (в интервале 514–607°C – последовательное разложение различных карбонатов, термическая диссоциация пирита с образованием магнетита и выделением серы при 635–644°C). Определены тепловые эффекты при разложении основных минералов исследуемых образцов и установлены фазовые составы конечных продуктов после синхронного термического анализа (нагревание до 850°C).

Показано, что совместный обжиг тонковкрапленных с тесным взаимным проращением сульфидов Fe, Zn, Pb и окисленных свинцово-цинковых руд в атмо-

сфере водяного пара позволяет реализовать несколько процессов: термическое разложение труднообогатимого окисленного минерала свинца (плюмбоярозита), селективное окисление сульфидов железа с образованием серосодержащих агентов, сопровождающееся дезинтеграцией взаимопросоившихся сульфидов свинца, цинка, и

пиросульфидирование разложившихся труднообогатимых окисленных минералов. Проведенные исследования термического разложения данных типов руд и результаты по совместному обжигу могут быть полезны при разработке технологии переработки труднообогатимых свинцово-цинковых руд с высоким содержанием ценных компонентов.

Библиографический список

1. Ставский А.П. Минеральное сырье: от недр до рынков. Цветные металлы. Аллюминий, медь, никель, олово, свинец, цинк: монография. В 3 т. Т. 2. М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2011. 496 с.
2. Новиков Н.И., Салихов В.А. Основные направления и перспективы развития минерально-сырьевой базы цветных и редких металлов в мире и России // Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2015. № 2. С. 138–150. <https://doi.org/10.17223/19988648/30/13>
3. На рынках цинка и свинца наблюдается небольшой дефицит // Металлоснабжение и сбыт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metallinfo.ru/ru/news/105621> (22.10.2019).
4. Иванов А.И., Вартамян С.С., Черных А.И., Волчков А.Г., Конкина О.М., Корчагина Д.А. [и др.]. Состояние минерально-сырьевой базы цветных металлов (свинец, цинк, медь, никель, кобальт) // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2017. № 4. С. 11–18.
5. Кабиров В.Р., Рейшахрит Е.И. Эффективность комплексного подхода к разработке месторождений металлических руд в группах // Записки Горного института. 2014. Т. 208. С. 23–26.
6. Иванов А.И., Вартамян С.С., Черных А.И., Волчков А.Г., Кузнецов В.В., Серавина Т.В. Состояние и перспективы развития МСБ меди, цинка и свинца России // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 100–106.
7. Дмитрак Ю.В., Цидаев Б.С., Дзапаров В.Х., Харебов Г.Х. Минерально-сырьевая база цветной металлургии России // Вектор ГеоНаук. 2019. Т. 2. № 1. С. 9–18. <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10002>
8. Ejtemaei M., Gharabaghi M., Irannajad M. A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method // Advances in Colloid and Interface Science. 2014. Vol. 206. P. 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.02.003>
9. Liu Wei, Zhu Lin, Han Junwei, Jiao Fen, Qin Wenqing. Sulfidation mechanism of ZnO roasted with pyrite // Scientific reports. 2018. Vol. 8. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-27968-z.pdf> (26.12.2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27968-z>
10. Han Junwei, Liu Wei, Wang Dawei, Jiao Fen, Zhang Tianfu, Qin Wenqing. Selective Sulfidation of Lead Smelter Slag with Pyrite and Flotation Behavior of Synthetic ZnS // Metallurgical and Materials Transactions B. 2016. Vol. 47. Issue 4. P. 2400–2410. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0693-y>
11. Chen Lu-Zheng, Wang Cong-bing, Zheng Yong-xing, Lv Jin-fang, Lai Zhen-ning, Pang Jie. Flotation of a Low-Grade Zinc Oxide Ore After Surface Modification at High Temperature // JOM. 2019. Vol. 71. P. 3166–3172. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03608-3>
12. Турысбеков Д.К., Семушкина Л.В., Муханова А.А., Нарбекова С.М. Возможность использования полисульфида кальция в качестве сульфидизатора при флотационном обогащении окисленных свинецсодержащих руд // Цветные металлы. 2018. № 10. С. 12–17. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.10.02>
13. Пат. № 2364639, Российская Федерация, С22В13/00, С22В1/02. Способ переработки труднообогатимой окисленной свинцовой руды / И.Г. Антропова, А.Н. Гуляшинов, В.А. Ламуев, П.Л. Палеев; заявитель и патентообладатель Байкальский институт природопользования Сибирского Отделения Российской Академии Наук. Заявл. 16.03.2007; опубл. 20.08.2009. Бюл. № 23.
14. Antropova I.G., Dambaeva A.Yu. Sulfidation of rebellious oxidized lead and zinc minerals in aqueous vapor environment // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 1. P. 174–178. <https://doi.org/10.1134/S1062739115010238>
15. Antropova I.G., Dambaeva A.Yu., Danzheeva T.Zh. Sulfidizing steam roasting application in oxidized plumbiferous ores processing circuits // Обогащение руд. 2016. № 6. P. 3–8. <https://doi.org/10.17580/or.2016.06.01>
16. Антропова И.Г., Гуляшинов А.Н. Термодинамическое моделирование процесса сульфидизирующего обжига окисленных соединений свинца и цинка в атмосфере перегретого водяного пара // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 11. С. 244–256.
17. Маркосян С.М., Анциферова С.А., Тимошенко Л.И. Метод дифференциально-термического анализа в оценке эффективности обогащения сульфидных руд // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. P. 1–8. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13389> (22.10.2019).
18. Zheng Yong-Xing, Lv Jin-Fang, Wang Hua, Wen Shu-Ming, Jie Pang. Formation of zinc sulfide species during roasting of ZnO with pyrite and its contribution on flotation // Scientific reports. 2018. Vol. 8. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27968-z>



<https://www.nature.com/articles/s41598-018-26229-3.pdf> (27.12.2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26229-3>

19. Jones F., Honghi Tran, Lindberg D., Liming Zhao, Hupa M. Thermal Stability of Zinc Compounds // *Energy & Fuels*. 2013. Vol. 27. Issue 10. P. 5663–5669. <https://doi.org/10.1021/ef400505u>

20. Гуляшинов П.А., Палеев П.Л., Субанакоев А.К., Гуляшинов А.Н. Исследование процесса термического разложения золотосодержащих концентратов с повышенным содержанием мышьяка // *Цветные металлы*. 2018. № 12. С. 44–48. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.12.06>

References

1. Stavskij AP. *Mineral Raw Materials: from Subsoil Resources to Markets. Non-ferrous metals. Aluminum, Copper, Nickel, Tin, Lead, Zinc: Monograph*. In 3 vol. Vol. 2. Moscow: Ruda i Metally; 2011, 496 p. (In Russ.)
2. Novikov NI, Salihov VA. The Main Directions and Prospects for the Development of the Mineral Raw Material Base of Non-Ferrous and Rare Metals in the World and in Russia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika = Tomsk State University Journal of Economics*. 2015;2:138–150. <https://doi.org/10.17223/19988648/30/13>
3. There is a Slight Deficit in the Zinc and Lead Markets. *Metallosnabzhenie i sbyt*. Available from: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/105621> [Accessed 22nd October 2019]. (In Russ.)
4. Ivanov AI, Vartanyan SS, Chernykh AI, Volchikov AG, Konkina OM, Korchagina DA, et al. Current State of the Mineral Base of Nonferrous Metals (Lead, Zinc, Copper, Nickel, Cobalt). *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie = Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2017;4:11–18. (In Russ.)
5. Kabirov VR, Reishakhrit EI. Effectiveness Complex Approach for Development Group Metal Ore Fields. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2014;208:23–26. (In Russ.)
6. Ivanov AI, Vartanyan SS, Chernykh AI, Volchikov AG, Kuznetsov VV, Seravina TV. The State and Prospects of Development of Mineral Resources of Copper, Zinc and Lead Russia. *Razvedka i ohrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2016;9:100–106. (In Russ.)
7. Dmitrak YV, Tsidaev BS, Dzaparov VKh, Kharebov GZ. Mineral and Raw Materials Base of Colored Metallurgy of Russia. *Vektor GeoNauk*. 2019;2(1):9–18. <https://doi.org/10.24411/2619-0761-2019-10002>
8. Ejtemaei M, Gharabaghi M, Irannajad M. A Review of Zinc Oxide Mineral Beneficiation using Flotation Method. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2014;206:68–78. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.02.003>
9. Liu Wei, Zhu Lin, Han Junwei, Jiao Fen, Qin Wenqing. Sulfidation Mechanism of ZnO Roasted with Pyrite. *Scientific Reports*. 2018;8:9516. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27968-z>
10. Han Junwei, Liu Wei, Wang Dawei, Jiao Fen, Zhang Tianfu, Qin Wenqing. Selective Sulfidation of Lead Smelter Slag with Pyrite and Flotation Behavior of Synthetic ZnS. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016;47(4):2400–2410. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0693-y>
11. Chen Lu-Zheng, Wang Cong-bing, Zheng Yong-

- xing, Lv Jin-fang, Lai Zhen-ning, Pang Jie. Flotation of a Low-Grade Zinc Oxide Ore after Surface Modification at High Temperature. *JOM*. 2019;71:3166–3172. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03608-3>
12. Turysbekov DK, Semushkina LV, Mukhanova AA, Narbekova SM. Possibility of Using Calcium Polysulfide as Sulphidizer in the Flotation of Oxidized Lead-Bearing Ores. *Tsvetnye metally*. 2018;10:12–17. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.10.02>
13. Antropova IG, Goulashinov AN, Lamuev VA, Paleev PL. *Method for Processing Refractory Oxidized Lead Ore*. Patent RF, no. 2364639; 2009. (In Russ.)
14. Antropova IG, Dambaeva AYU. Sulfidation of Rebelious Oxidized Lead and Zinc Minerals in Aqueous Vapor Environment. *Journal of Mining Science*. 2015;51(1):174–178. <https://doi.org/10.1134/S1062739115010238>
15. Antropova IG, Dambaeva AYU, Danzheeva TZH. Sulfidizing Steam Roasting Application in Oxidized Plumbiferous Ores Processing Circuits. *Obogashchenie Rud*. 2016;6:3–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2016.06.01>
16. Antropova IG, Gulyashinov AN. Thermodynamic Modeling of the Process of Sulfidizing Roasting of Oxidized Compounds of Lead and Zinc at the Atmosphere of Overheated Water Vapour. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2010;11:244–256. (In Russ.)
17. Markosyan SM, Antsiferova SA, Timoshenko LI. The Method of the Differential Thermal Analysis In An Estimation Of Sulphide Ores' Dressing Efficiency. *Modern Problems of Science and Education*. 2014;3:1–8. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13389> [Accessed 22nd October 2019]. (In Russ.)
18. Zheng Yong-Xing, Lv Jin-Fang, Wang Hua, Wen Shu-Ming, Jie Pang. Formation of Zinc Sulfide Species during Roasting of ZnO with Pyrite and its Contribution on Flotation. *Scientific Reports*. 2018;8:7839. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26229-3>
19. Jones F, Honghi Tran, Lindberg D, Liming Zhao, Hupa M. Thermal Stability of Zinc Compounds. *Energy & Fuels*. 2013;27(10):5663–5669. <https://doi.org/10.1021/ef400505u>
20. Gulyashinov PA, Paleev PL, Subanakov AK, Gulyashinov AN. Understanding the Thermal Decomposition of Gold Concentrates with High Arsenic Concentration. *Tsvetnye Metally*. 2018;12:44–48. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.12.06>

Критерии авторства

Гуляшинов П.А., Антропова И.Г., Гуляшинов А.Н. 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гуляшинов Павел Анатольевич,

кандидат технических наук,
младший научный сотрудник
Лаборатории химии и технологии природного сырья,
Байкальский институт природопользования
Сибирского отделения Российской академии наук,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия;
✉ e-mail: gulpasha@mail.ru

Антропова Инна Геннадьевна,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
Лаборатории химии и технологии природного сырья,
Байкальский институт природопользования
Сибирского отделения Российской академии наук,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия;
e-mail: inan@binm.ru

Гуляшинов Анатолий Никитич,

кандидат технических наук, доцент,
ведущий инженер
Лаборатории химии и технологии природного сырья,
Байкальский институт природопользования
Сибирского отделения Российской академии наук,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия;
e-mail: agul50@mail.ru

Authorship criteria

Gulyashinov P.A., Antropova I.G., Gulyashinov A.N. 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.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Gulyashinov,

Cand. Sci. (Eng.)
Junior Researcher of the Laboratory of Chemistry
and Technology of Natural Raw Materials,
Baikal Institute of Nature Management SB RAS,
6, Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia;
✉ e-mail: gulpasha@mail.ru

Inna G. Antropova,

Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Laboratory of Chemistry
and Technology of Natural Raw Materials,
Baikal Institute of Nature Management SB RAS,
6, Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia;
e-mail: inan@binm.ru

Anatoly N. Gulyashinov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Engineer of the Laboratory of Chemistry
and Technology of Natural Raw Materials,
Baikal Institute of Nature Management SB RAS,
6, Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia;
e-mail: agul50@mail.ru



Effect of silicon oxide reduction operational aspects on material and heat flow ratio in ore-thermal furnace

© Nikolay N. Zobnin^{*,***}, Sailaubai O. Baisanov^{**}, Alibek S. Baisanov^{**}, Azat M. Musin^{**}

^{*}Tau-Ken Temir LLP, Karaganda, Kazakhstan,

^{**}Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Kazakhstan

^{***}Karaganda State Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

Abstract: A study was carried out into the effect of the loading method and surface distribution of charges at the furnace top on the parameters of carbon reduction of silica in submerged arc furnaces. In the study, the direct physical modelling method was applied. The experiments were carried out under large-scale laboratory conditions using a 200 kVA single-electrode furnace of the Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute (Kazakhstan). An additional dynamic industrial experiment was conducted in the 30 MVA furnace of Tau-Ken Temir LLP. In a large laboratory furnace, two smelting campaigns were performed, each using different approaches to the treatment of the furnace top. In the first campaign, no balancing in the energy and material flows of the system took place, resulting in forced slipping and an uncontrolled feed rate of the charge. The second campaign, conversely, included the specified balancing measures. A similar study took place over 3 days under industrial conditions. The following technological parameters were empirically determined: specific electricity consumption, furnace average active power and performance, as well as power per unit area of the furnace hearth. The Fe, Al, Ca, Si material balance of the smelting was compiled. In order to assess the load balance, the concept of charge excess in relation to charge demand at the current furnace power was used for the first time. This concept value was determined as the ratio of number of batches actually loaded relative to the theoretically-calculated number ensuring the harmonisation of material and energy flows in the furnace. As a result of the research, an increase in the interval between the furnace top treatments up to 30 min and maintenance of harmonisation between material and thermal flows in the ore smelting furnace was established for increasing silicon extraction efficiency by 10–15%. In addition, oscillations in the phase current were stabilised. The proposed balancing concept was established to support the rapid elimination of crisis conditions in an industrial furnace.

Keywords: silicon metallurgy, technical silicon, thermal and material balances, electric current distribution, ore-thermal furnace, charge loading

Acknowledgments: The authors are deeply grateful to the management of Tau-Ken Samruk NGK JSC, the parent company of Tau-Ken Temir LLP, namely the chief business development director of Tau-Ken Samruk NGK JSC A. N. Arshabekov, who supported the financing of present scientific research as part of the execution of the contract No. 04-02-437 of November 10, 2017 on the topic: "Development of the technology for smelting of commercial silicon using a briquetted mono-charge obtained from various types of low-ash reducing agents and gas cleaning dust (microsilica)". We are grateful to all the operators and employees of Tau-Ken Temir LLP and the Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute, who showed patience and understanding in the implementation of this work, and hope to continue in mutually beneficial cooperation.

Information about the article: Received January 09, 2020; accepted for publication March 11, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Zobnin NN, Baisanov SO, Baisanov AS, Musin AM. Effect of silicon oxide reduction operational aspects on material and heat flow ratio in ore-thermal furnace. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):444–459. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-444-459>

Влияние операционных аспектов процесса восстановления оксида кремния на соотношение материального и теплового потоков в рудно-термической печи

Н.Н. Зобнин^{*,***}, С.О. Байсанов^{**}, А.С. Байсанов^{**}, А.М. Мусин^{**}

^{*}ТОО «Тай-Кен Темір», г. Караганда, Казахстан

^{**}Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, г. Караганда, Казахстан

^{***}Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан

Резюме: Цель – влияние способа осуществления технологических операций загрузки сырья на колошник печи и его распределение по поверхности на показатели процесса восстановления кремнезема углеродом в печах с погруженной электрической дугой. Применяли прямое физическое моделирование. Эксперименты проводились в крупнолабораторных условиях на одноэлектродной печи мощностью 200 кВ·А Химико-металлургического института им. Ж. Абишева (Казахстан). Также производили активный промышленный эксперимент в печи мощностью 30 МВ·А ТОО «Тәу-Кен Темір». В крупнолабораторной печи проведено две кампании плавки с различным подходом к обработке колошника: в первый период – без соблюдения баланса энергетического и материального потоков в системе с принудительной осадкой шихты неконтролируемой интенсивностью подачи шихты, во втором – с обеспечением указанного баланса. Аналогичная работа проводилась в течение 3 суток в промышленных условиях. Были рассчитаны фактически достигнутые технологические показатели: удельный расход электроэнергии, средняя активная мощность и производительность печи, мощность на единицу площади пода печи. Составлен материальный баланс плавки по Fe, Al, Ca, Si. Впервые для оценки сбалансированности загрузки использовали понятие избытка шихты по отношению к потребности в шихте при текущей мощности печи. Принимали эту величину как отношение фактически загруженных в печь навесок к теоретически рассчитанному количеству навесок, обеспечивающему гармонизацию материального и энергетического потоков в печи. В процессе исследований было доказано, что увеличение интервала между обработками колошника до 30 мин и достижение гармонизации между материальным и тепловым потоками в рудно-термической печи позволяют увеличить извлечение кремния минимум на 10–15%. Стабилизируются колебания фазного тока. Установлено, что на основе концепции балансирования возможно в краткие сроки вывести промышленную печь из сложных кризисных состояний.

Ключевые слова: металлургия кремния, технический кремний, тепловой и материальный балансы, распределение электрического тока, рудно-термическая печь, загрузка шихты

Благодарности: Авторы высказывают глубокую благодарность руководству АО «НГК «Тәу-Кен Samruk», которая является материнской компанией ТОО «Тәу-Кен Темір»: главному директору по развитию бизнеса АО «НГК «Тәу-Кен Samruk» А.Н. Аршабекову, поддержавшему финансирование данных научных исследований в рамках исполнения договора № 04-02-437 от 10 ноября 2017 г. по теме: «Разработка технологии выплавки технического кремния с использованием брикетированной моношихты, полученной из различных видов низковольтных восстановителей и пыли газоочистки (микросилики)». Благодарны всем операторам и сотрудникам ТОО «Тәу-Кен Темір» и Химико-металлургического института им. Ж. Абишева, которые проявили терпение и понимание при осуществлении этой работы, и надеемся на продолжение взаимовыгодного сотрудничества.

Информация о статье: Дата поступления 09 января 2020 г.; дата принятия к печати 11 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Зобнин Н.Н., Байсанов С.О., Байсанов А.С., Мусин А.М. Влияние операционных аспектов процесса восстановления кремния на соотношение материального и теплового потоков в рудно-термической печи. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 444–459. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-444-459>

1. INTRODUCTION

The production of silicon is based on carbon thermal reduction of silica-containing raw materials in an ore smelting furnace. This development of this branch of metallurgy proceeds in the directions of expanding the silica-containing raw material base and carbon reducing agents, as well as solving various environmental problems associated with silicon production¹ [1–14]. Thus, despite positive results achieved in terms of technological parameters, the problem of improving parameters for commercial silicon production remains highly relevant [15–17]. However, smelting parameters are often affected by instability associated with the electrical mode of the ore

smelting furnace (OSF). In industrial settings, both single- and three-phase ore smelting furnaces are utilised. Here, a key role in the smelting process is played by the magnitude of the current flowing through each electrode. At the same time, temporal changes in current magnitude also appear to be of great importance. An example of a phase current diagram under conditions of silicon production at the FESIL RANA Metall AS company (Norway) is shown in Fig. 1 [16]. As can be seen from the figure, the arc repeatedly jumps onto the cavity wall, about 30 cm up the lateral surface of the electrode, and then gradually descends again after a period of about half an hour ending the full charge “accumulation-collapse” cycle having 60 min duration.

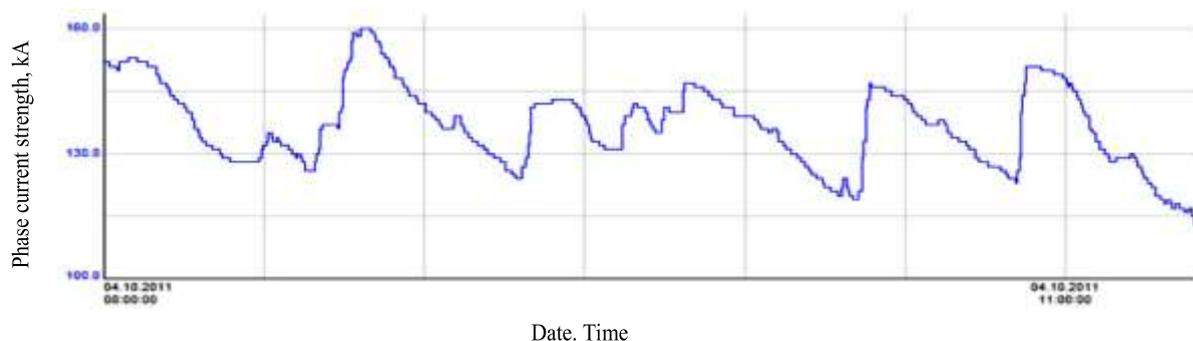


Fig. 1. Example of an electric arc phase current diagram
Рис. 1. Пример электрической дуги

Although under ideal silicon smelting conditions, a constant phase current should be ensured, in practice, this is unachievable, since changes in current strength are determined by the various technological operations. Among the most important of these are charge loading and OSF top treatment.

The charging of furnaces is carried out in a cyclic manner. At the first stage, fresh raw material is loaded in the top without movement. Next, heating proceeds with the removing of moisture and volatiles. In this case, a fresh charge is supported by a layer of raw material sintered into the monolith. This monolith forms the cover of the gas cavity (Fig. 2). At the bottom of the cavity, thermally-prepared materials are localised, having fallen there during the previous smelting period, referred to in terms of "accumulation". At the bottom of the cavity, reduction processes occur with the formation and accumulation of liquid silicon. During this period, the volume of the cavity increases. The electric arc moves from the side of the electrode down to the end part. The majority of the current flows not through the solid wall of the cavity, but rather through the liquid melt. The electrical resistance of the melting bath decreases, leading to a gradual increase in current from the minimum to the maximum value (see Fig. 1). At the end of the accumulation, the partially-melted sintered layer flows down under the fresh charge. During this time, the fresh charge has already been heated up and is losing moisture and

volatiles due to evaporation. The thickness of the sintered layer in the upper part of the cavity then decreases, followed by a new portion of the charge falling into the cavity under its own weight. This period is referred to as "charge collapse".

The new portion of raw materials accumulating at the bottom of the cavity cools the melt, thereby reducing its electrical conductivity. The strength of the arc current in the end part of the electrode ("end current") is reduced and a current redistribution appears in the increase direction of the side arc current ("side current"). A gradual decrease in the current is observed due to an increase in the electrical resistance of the smelting bath. As can be seen from the diagram presented in Fig. 1, the periods of accumulation and collapse, involving the possible appearance of anomalies, last about 30 minutes. Thus, following the end of the collapse period, at about 10:15, a period of sharp increase in current strength is observed for 5 min (see Fig. 1). Such sharp fluctuations are undesirable, resulting in a violation of the OSF cyclic operation, increased energy consumption and reduced extraction of silicon (X_{Si}). Several possible explanations for such fluctuations can be provided. Some malfunctions in furnace operations can be attributed to operator error when loading raw materials into the furnace using a special machine for their surface distribution (Fig. 3).

¹Katkov O.M. Smelting of commercial silicon: textbook. Irkutsk: ISTU Publishing House, 1999. 243 p. / Катков О.М. Выплавка технического кремния: учеб. пособ. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 243 с.

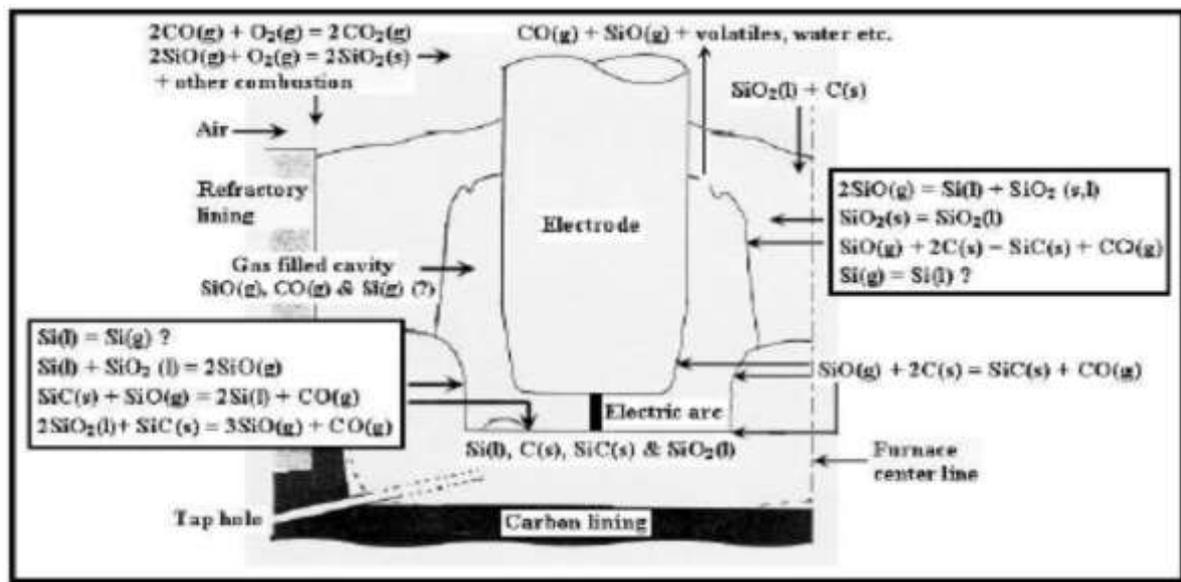


Fig. 2. Schematic representation of the area around one electrode (based on the drawings of Schei, Tveit and Tuset [15])
 Рис. 2. Схематическое изображение области вокруг одного электрода (данный рисунок основан на рисунках Шея, Твита и Тусета [15])

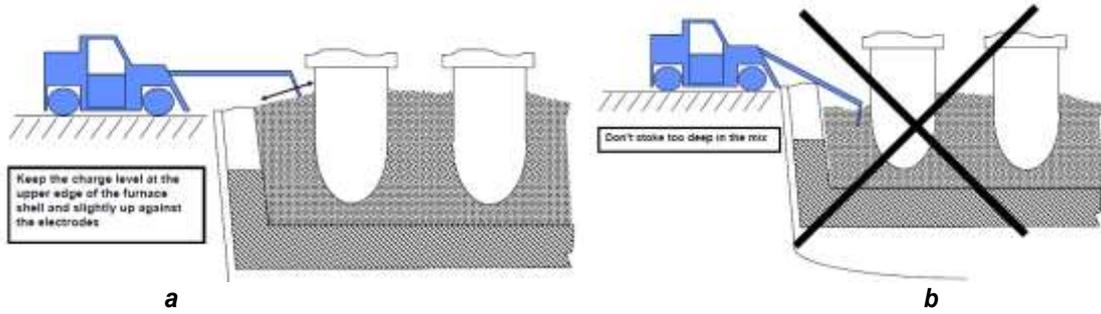


Fig. 3. Surface distribution of raw materials in the furnace: a – correct operation; b – incorrect operation
 Рис. 3. Распределение сырья на поверхности печи: a – правильное ведение операций; b – неправильное ведение операций

If the operator inserts the working mechanism too deeply into the OSF, wall destruction occurs in the silicon carbide-containing cavity where low electrical resistance is present. When SiC falls to the bottom of the cavity, the current increases rapidly due to the low electrical resistance of silicon carbide. A similar carbide effect on the distribution of current (lateral and end) is described in detail in the literature [18, 19]. This represents a negative factor: the mechanism of the process changes, carbide in the normal state acts as a collector of gaseous silicon monoxide and reaction (1) proceeds. In the case of silicon carbide entering the bottom of the cavity, reaction (2) occurs [2]. When the silicon

carbide in the wall of the cavity is consumed, silicon monoxide is carried out by the exhaust gases from the furnace, resulting in decreased silicon extraction:

$$\text{SiC}_s + \text{SiO}_g = 2\text{Si}_l + \text{CO}_g, \quad (1)$$

$$2\text{SiC}_s + \text{SiO}_{2l} = 3\text{Si}_l + 2\text{CO}_g. \quad (2)$$

In addition, if insufficient time is provided for heating the charge in the upper part of the furnace, it enters the cavity too early. As a result of this, the temperature at the bottom of the cavity decreases. The cold charge then mixes with liquid products, giving rise to a high viscosity magmatic “swamp” formed at the bot-



tom of the cavity. During the tapping of liquid silicon, this magma closes the tap hole and prevents liquid silicon from flowing freely. In such cases, high-viscosity magma has to be extracted through the tap hole using manual devices (Fig. 4 contains a sample of such material extracted through the tap hole of the OSF).

The magmatic mixture has the form of cylinders with a diameter of 100–150 mm and a length of 3–4 m with characteristic transverse notches from the hand tool.

In cases where OSF operators lack adequate training, the number of above-described smelting violations increases. In trying to speed up the process, such a poorly-trained operator typically loosens the raw materials in the upper part of the furnace when loading the charge by immersing the working device of the processing machine deep in the charge. As a result, the current diagram acquires the form shown in Fig. 5 (this diagram was obtained under the production conditions of Tau-Ken Temir LLP). At this enterprise, the furnaces are installed according to the description provided in a previous work [20]. As can be seen from Fig. 5, the phase current is very unstable. These effects are partially explained in terms of phase transformations of quartz into its modification, cristobalite, and the physical processes of softening and melting of quartz [21, 22]. From the standpoint of physical modelling, the cyclical nature of the side and end current distribution is described by the authors of [19]. However, is also necessary to establish a connection between the process model and the practical implementa-

tion of technological operations.

Intensive loosening of the charge leads to an imbalance between material and thermal flows in the furnace. Observing the reduction in the volume of the cavity, a poorly-trained operator may wrongly conclude that the next portion of the charge should be fed into the furnace. Thus, the actions of the operator are based on a subjective assessment of the OSF loading requirement, but the quantity of charge introduced into the furnace is not provided with sufficient energy. The importance of accurate exergetic balancing is discussed by the authors in [23]. However, this technique must also be coordinated closely with the order of the operator actions, with raw materials loaded per unit of time in accordance with the consumption of electricity for the same previous period. With insufficient energy, the reaction remains incomplete, stopping at the stage of SiO formation. This partially explains the increased formation of silica fume under the conditions of Tau-Ken Temir LLP equal to 1 t/t Si.

It is important that the tapping of liquid silicon be accomplished following 1–2 cycles of “accumulation – collapse”, i.e. at the end of accumulation under maximum phase current strength and not at an arbitrary moment. If the tapping of silicon is carried out during the collapse period, the mixture falling to the bottom of the cavity will impede the tapping.

However, since there are differences of opinion among experts in the field concerning the above-described approach to OFS charging, the present study is devoted to demonstrating the correctness of the concept.



Fig. 4. Magmatic mixture of fused silica and slag with various content of residual silicon oxide and reduced silicon

Рис. 4. Магматическая смесь плавленого кварца, шлака с различным содержанием неразложившегося оксида кремния и восстановленного кремния

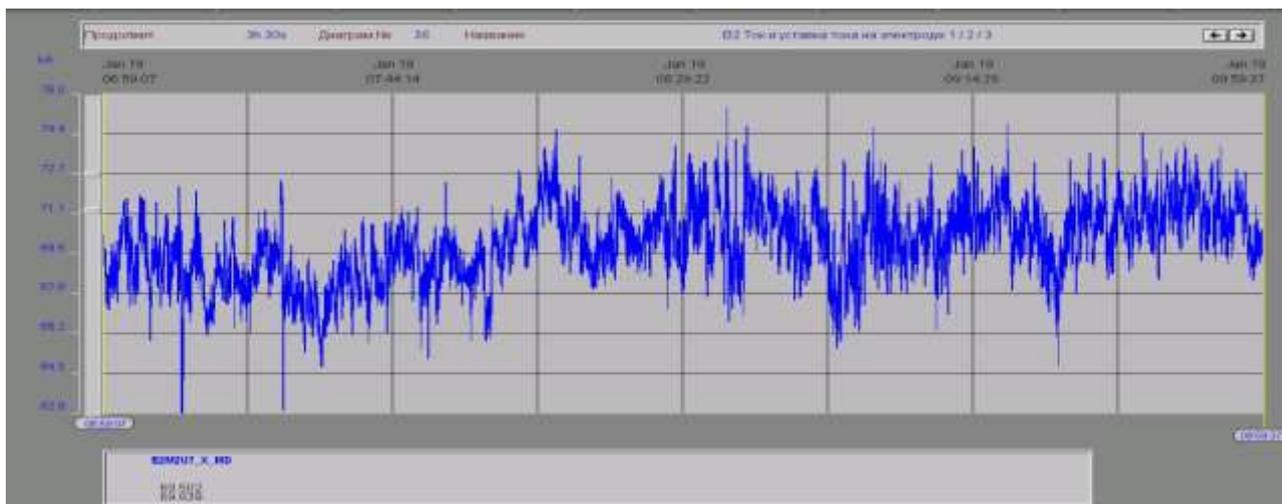


Fig. 5. An example of the phase current diagram under conditions of incorrect technological operations at Tau-Ken Temir LLP with an “accumulation – collapse” cycle time of 15–20 min

Рис. 5. Пример диаграммы фазного тока в условиях неправильного ведения технологических операций ТОО «Тай-Кен Темір» с продолжительностью цикла «накопление – обвал шихты» 15–20 мин

2. MATERIALS AND METHODS

At the initial stage, the study of the charge loading operation was carried out in a 200-kVA electric arc furnace located in the laboratory of the Zh. Abishev Chemical and Metallurgical Institute (Karaganda, Kazakhstan). The main silica-containing raw material used for the study was quartz obtained from the Sarykul deposit. The chemical and granulometric composition of raw materials and car-

bonaceous reducing agents are presented in [20].

The study was carried out in a two-electrode electric furnace with one electrode coked in the hearth with a bottom mass (Fig. 6), that is, the electric furnace has a structure similar to an Mige type electric furnace (Japan). The transformer was powered by a voltage of 380 V. The electric furnace was powered from two OSU-100/0.5 single phase dry type transformers connected in parallel.

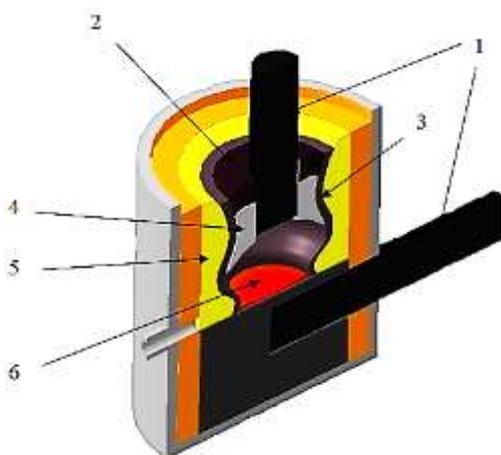


Fig. 6. The structure of the melting bath of the furnace with a 200 kVA transformer: 1 – electrodes; 2 – initial charge; 3 – softened charge zone; 4 – transition zone; 5 – wall lining; 6 – melt and silicon, carbide crust

Рис. 6. Строение ванны рудно-термической печи с трансформатором мощностью 200 кВ·А: 1 – электроды; 2 – исходная шихта; 3 – зона размягченной шихты; 4 – переходная зона; 5 – пристенный гарнисаж; 6 – расплав и кремний, карбидная настель



The arc discharge temperature of 2500–4500°C was provided by a graphite electrode having a diameter of 150 mm. The furnace is lined with fireclay bricks and the round furnace bath is 40 cm in diameter. The distance from the electrode to the tap hole block and the rear wall of the furnace comprises 21–22 and 29–30 cm, respectively. The bath depth is equal to 40 cm. Up to the furnace tap hole level, the hearth is sintered of the electrode mass coked for 12 hours under current with periodic shutdown of the furnace. The electrode is moved manually. The furnace is equipped with an electric meter connected via a 400/5 current transformer (with a ratio of 80). Additional devices are used for measuring secondary and primary currents, as well as secondary voltage. On the low-voltage side, the variation limits of current and voltage comprise the value of 0–4000 A and 0–50 V, respectively. Silicon is drained through a tap hole closed and opened by a wooden pole. The possibility of a stepwise change in the secondary voltage was also considered, since the furnace transformer has four voltage levels of 18.4, 24.5, 36.8 and 49.0 V. The voltage reduction in the furnace operation was about 4–8 V, depending on the voltage stage (a larger voltage drop was recorded at high stages).

The main electrical parameters of the ore smelting electric arc furnace with a 200-kVA transformer are given in Table 1.

3. RESULTS OF THE LARGE-SCALE LABORATORY STUDY

Prior to the start of study, work was carried out to prepare the OSF for electric smelting. The electric furnace was heated for 12 hours on a coke bed in order to conduct electric current and maintain hearth integrity. Following heating, the electric furnace was completely cleaned of the coke bed remnants. The electric heating mode period involved a secondary voltage value of 24.6 V and current strength

from the high side equal to 150–200 A.

The start of the furnace for heating took place on 2 December, 2017 at 20:00 followed by charging on 3 December, 2017 at 08:30. The following electrical parameters of the smelting were maintained: nominal secondary voltage of 36 V (32 V given the voltage drop) and current strength of 2500 A. For the formation of the lining, the first two heavy charges composed of coal, charcoal and quartz in quantities of 4.2, 2.3 and 20 kg, respectively, were loaded in the absence of a reducing agent. The lack of reductant from stoichiometry comprised 56%. These charges were loaded until 12:00 on 3 December. Next, the loading of the standard charge was commenced. The standard charge composition included coal, charcoal, special coke², wood chips and quartz in quantities of 8.3, 4.7, 1.2, 3 and 20 kg, respectively. The excess reducing agent was 3.3%. For more precise control over the process, the charge volume was halved to 10 kg in terms of quartz content starting from the second charge. Loading of the standard charge was carried out until 19:00 on 3 December. At the same time, there was an increase in the characteristics of the furnace operation in the absence of a reducing agent, i.e. intense gas emission from the tap hole, deep electrode landing, sintering of the top and unstable current load. In order to solve this problem, the composition of the charge with an excess of carbon was established containing coal, charcoal, special coke, wood chips and quartz in amount of 3.8, 0.6, 1.5 and 10 kg, respectively. The excess reducing agent comprised 42%. The top was raised to the upper level by 01:00 on 4 December. The charge mass of 246.2 kg was spent to fill the melting bath. The process was conducted with such a composition of the charge until 09:00, December 4. By 03:00, 4 December, the first tapping of silicon took place, with subsequent tapping carried out every 2 hours. From this moment, the excess of reducing agent was

²Ulieva GA. The study of the physical-chemical properties for special types of coke and its application for smelting high-silicon alloys: Abstract. Cand. Thesis: 05.16.02. Yekaterinburg, 2013. 151 p. / Ульяева Г.А. Исследование физико-химических свойств специальных видов кокса и его применение для выплавки высококремнистых сплавов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Екатеринбург, 2013. 151 с.

Table 1

OSU-100/0.5x2 transformer rating for a furnace with a total power of 200 kVA

Таблица 1

**Номинальные электрические характеристики трансформатора
 ОСУ–100/0,5х2 на печи общей мощностью 200 кВ·А**

Power, kVA	High voltage side				Low voltage side			
	Outputs	U, V	I, A	Connections	Outputs	U, V	I, A	Connections
200	AX	380	526	x-a ₁ , x-a	x ₃ -a	49.0	4070	–
150	AX	380	395	x-a, x ₂ -a	x ₃ -a	36.8	4070	a ₃ -x ₄
100	AX	380	263	a ₁ -x ₁	x ₃ -a	24.5	4070	x ₁ -a ₂
75	AX	380	197.6	a ₂ -x ₂	x ₃ -a	18.4	4070	a ₄ -x ₂

optimised at the level of 15–25% creating the conditions for the commencement of the study. The countdown for the amount of accumulated silicon and the charge used for its production was started from the moment of the second tapping.

The effect of charge loading operations on smelting process parameters was studied over the course of large-scale laboratory tests. The time between the technological operations of top processing and the intensity of their performance was alternated with silicon extraction monitoring. The study was carried out in two stages. At the first stage, smelting was carried out for 14 hours in the mode of continuous top processing, with new portions of the charge being supplied with minor interruptions in this process. The cavities were intentionally pierced and a fresh mixture loaded into the thus-formed voids (this represents the process under the conditions of Tau-Ken Temir LLP). After analysing the intermediate results, the second mode was implemented with pauses between top treatments equal to 30 minutes. In this case, only natural changes in the structure of the cavity occurred. The duration of the second stage comprised 65.5 hours. Following completion of the large-scale laboratory tests, experiments were carried out under semi-industrial conditions of Tau-Ken Temir LLP enterprise using the previously-used equipment as described in [20].

4. RESULTS OF INDUSTRIAL TESTS

The methodology for achieving the balance of material and thermal flows in indus-

trial OSF of the Tau-Ken Temir LLP was adopted as follows. For example, the amount of electricity consumed by the furnace over the past period, e.g. consumed power for 1 hour, was determined from the control devices. Consumption for 1 h was equal to 19.5 MW of active power. Hence, the consumption of raw materials per elemental silicon is 19.5/12.5 = 1.56 t/h. Here, 12.5 MWh/t is the generally accepted energy consumption per 1 tonne of commercial silicon according to published data [15–17]. Equivalent to silicon dioxide, this value comprises 1.56·60/28 = 3.3428 t/h. At Tau-Ken Temir LLP, it is customary for the charge consumption to be recorded in batches. A batch consists of a charge portion of a certain composition having a typical batch weight of 1100–1200 kg. The amount of quartz in the batch is always fixed and equal to 600 kg (0.6 t). Therefore, the number of batches is 3.3428/0.6 = 5.57 batches/h. In weight terms, this comprises 5.57 · 1.15 = 6.4 tonnes of charge/h.

The existing control system provides no direct accounting the amount of charge loaded for a certain period of time. Therefore, to account for and maintain a fixed charge feed rate, the following method was applied. The charge was loaded approximately 2 times per hour for implementing the cycle according to Fig. 1. Hence, 6.4/2 = 3.2 tonnes of charge must be placed in the furnace in one load. The charge is fed evenly from six furnace bunkers with 3.2/6 = 0.53 tonnes of charge each. The furnace bunker charge control has the discrete property of a fixed amount of charge being provided with a single press of the control but-



ton. For our purposes, this is ≈ 0.25 t. In each particular case, this value must be determined empirically. Therefore, when feeding the charge from each bunker, the button should be pressed by operator no more than $0.53/0.25 \approx 2$ times. The amount of charge can be increased by $\approx 20\%$, corresponding with achievable silicon extraction of 80%. Here, the human factor appears to be key: the operator should not feed the OSF with more charge than calculated even if this amount subjectively seems insufficient. The operator's skill consists in distributing the calculated amount of the charge so as to evenly cover the entire top and prevent the development of local gas emissions, i.e. so-called "blowholes". The technologist must monitor the consumed power hourly and adjust the amount of charge fed when the active power consumption changes.

In practice, it was not always possible to maintain a 30-minute pause between the top treatments. In addition, the treatment is carried out at different speeds by different operators. In this regard, under industrial conditions, the parameter of I_k intensity of furnace top processing in time was used. By this definition, the ratio refers to the time spent on top treatment to the total time of treatment and pauses between treatments (this parameter was evaluated every hour during operation).

Unfortunately, it was not always possi-

ble to convey an understanding of the balanced charge loading to each operator. Here, the lack of operator experience was the main adverse factor. In this regard, over a certain period of time, a charge was loaded into the furnace in various quantities, both upward and downward. In order to assess the load balance, the concept of charge excess (CE) in relation to the required charge at the current furnace power was used. This value is taken as the ratio of the actually charged batches to their theoretically calculated number. The ratio was also calculated every hour with X_{Si} estimated by the weight of solid commercial silicon after refining.

5. RESULTS AND DISCUSSION

The consumption of raw materials and the yield of silicon, obtained as a result of the study for a 200-kVA furnace, are presented in Table 2.

As can be seen from the results presented in Table 2, the change in top-treatment and charge-feeding modes significantly reduced the consumption rate of raw materials. Thus, the consumption of quartz comprised 2,7 t/t Si approached the values characteristic for the production of silicon in Norway, i.e. 2,5 t/t. The magnitude of the phase current was significantly stabilised, with a large and constant cavity volume and freely tapped silicon.

Table 2

The amount of consumed charge and obtained silicon during experiments in a 200-kVA furnace

Таблица 2

Количество израсходованной шихты полученного кремния в ходе опытов на печи мощностью 200 кВ·А

Smelting campaign		Charge composition					
		Hard coal	Charcoal	Quartz	Special coke	Wood chips	Silicon, kg
First stage	Consumed per stage, kg	45	35	90	13	5	28
	Consumption rate, t/t	1.61	1.25	3.21	0.18	0.46	
Second stage	Consumed per stage, kg	134	128	340	8	46	126
	Consumption rate, t/t	1.06	1.02	2.70	0.06	0.37	

In addition, the most important technological parameters were calculated as follows: X_{Si} – amount of electricity consumed per stage (consumed power); W_t – silicon specific consumption of electricity; average active power of the furnace; G – furnace performance; and W_s – power per unit area of the furnace hearth. The above parameters are presented in Table 3. As can be seen from the Table 3, due to a change in the method of charge loading in the reduction process, X_{Si} is significantly increased, yet no rise in power and performance was established. This is possibly due to the small number of experiments; in the case of a larger number, other positive changes can be expected.

The calculation of silicon-, iron-, aluminium- and calcium- extraction from charge materials into commercial silicon with other elements is presented in Tables 5 and 6 as

the balance of reduction smelting process in the first and second stages of study. In Table 4, the calculated amount of the above elements transferred into a commercial silicon product at the first stage of the study is provided. These data were used in calculating the material balance. As can be seen from the results, the X_{Si} value is justified and takes the amount of technical silicon obtained in each tapping into account along with its chemical composition. The reliability of the results is also confirmed by the coincidence of the process balance in relation to the amount of iron completely transferred to silicon melt, according to the published data [24]. This statement is confirmed by conducted experiments. Although an uncertainty is observed regarding the extraction of aluminium and calcium, aluminium extraction was 78 and 46% in the first and second stages, respectively, yet the X_{Si} is

Table 3
The main technological parameters of the commercial silicon smelting during the study

Таблица 3
Основные технологические показатели при выплавке технического кремния в ходе проведения исследований

Stage	Consumed power, kWh	Active power, kW	W_t , kWh/kg	X_{Si} , %	G , kg/h	W_s , kW/m ²
First	1096	78.2	39.14	63.62	2.00	622.6
Second	5112	78.0	40.50	78.07	1.92	621.0

Table 4
Calculation of iron, aluminium and calcium amounts transferred to commercial silicon during smelting

Таблица 4
Расчет количества железа, алюминия, кальция, перешедших в технический кремний при плавке

Tapping No	Mass of commercial silicon, kg	Chemical composition							
		Fe		Al		Ca		Si	
		%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
1	2.2	3.03	0.066	3.99	0.087	0.12	0.002	92.36	2.031
2	4.3	2.4	0.103	3.66	0.157	0.21	0.009	93.28	4.011
3	2.2	2.57	0.056	3.8	0.083	0.23	0.005	92.96	2.045
4	0.8	2.67	0.021	2.97	0.023	0.2	0.001	93.68	0.749
5	3.0	2.77	0.083	2.48	0.074	0.16	0.004	94.27	2.828
6	4.7	2.7	0.126	3.21	0.150	0.26	0.012	93.49	4.394
7	6.0	2.17	0.130	3.6	0.216	0.3	0.018	93.61	5.616
8	4.9	1.1	0.121	3.93	0.192	0.31	0.015	92.9	4.552
Total	28.0	–	0.709	–	0.986	–	0.068	–	26.228



Table 5

**Iron, aluminium, calcium and silicon balance of the reduction smelting
(first stage of study)**

Таблица 5

**Баланс процесса восстановительной плавки по железу, алюминию, кальцию
и кремнию (первый этап исследований)**

Consumption	Charge mass, kg	Fe		Al		Ca		Si	
		%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Quartz	90	0.65	0.59	1.14	1.03	0.50	0.45	44.88	40,39
Hard coal	45	0.19	0.09	0.44	0.20	0.16	0.07	1.71	0.77
Charcoal	35.1	0.22	0.08	0.04	0.01	0.73	0.25	0.10	0.04
Special coke	5.4	0.17	0.01	0.38	0.02	0.17	0.01	0.52	0.03
Total			0.76		1.26		0.79		41.22
Yield		Fe		Al		Ca		Si	
		kg	X _{Fe} , %	kg	X _{Al} , %	kg	X _{Ca} , %	kg	X _{Si} , %
Silicon		0.71	93.86	0.99	78.09	0.07	8.71	26.23	63.62

* extraction of the corresponding elements

shown to increase. The extraction of aluminium at the first stage is close to the literature data of 85%. Possibly, the deviation at the second stage is explained by fluctuations in the chemical composition of quartz raw material. This usually occurs due to a change in the fraction of Al₂O₃ in the form of inclusions and clay impurities entering the OSF. In order to identify the causes of this contradiction, longer studies are required. Calcium extraction is at a relatively low but stable level of 8–13%. Alt-

hough this is slightly lower than the generally accepted value (40–70%), this discrepancy can be explained in terms of the minimisation of excess carbon in the mixture with respect to stoichiometry.

In general, the adequacy of the results is confirmed by the extraction of silicon at the first stage of the study coinciding with the results obtained at Tau-Ken Temir LLP under the same conditions of technological operation.

Table 6

**Iron, aluminium, calcium and silicon balance of the reduction smelting
(second stage of study)**

Таблица 6

**Баланс процесса восстановительной плавки по железу, алюминию, кальцию
и кремнию (второй этап исследований)**

Consumption	Charge mass, kg	Fe		Al		Ca		Si	
		%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
Quartz	340.3	0.70	2.38	1.14	3.89	0.50	1.70	44.85	152.61
Hard coal	134.3	0.19	0.26	0.44	0.60	0.16	0.22	1.71	2.29
Charcoal	8.1	0.22	0.02	0.04	0.00	0.73	0.06	0.10	0.01
Special coke	18.7	0.17	0.03	0.38	0.07	0.17	0.03	0.52	0.10
Total			2.69		4.56		2.01		155.01
Yield		Fe		Al		Ca		Si	
		kg	X _{Fe} , %	kg	X _{Al} , %	kg	X _{Ca} , %	kg	X _{Si} , %
Silicon		2.67	99.28	2.14	46.86	0.28	13.94	121.01	78.07

Based on the results of the large-scale laboratory studies, new approaches for the implementation of the reduction smelting process were evaluated. The results of studies conducted under industrial conditions of Tau-Ken Temir LLP are as presented in Tables 7 and 8. As can be seen from the results of 26 December, 2017, the applied charging mode was characterised by significant instability.

With a charge excess was 70–90%, the cavities were small and the furnace could not gain full power due to the regular collapses of the thermally-unprepared charge to the bottom of the cavity. As a result, a severe violation of technology and poor process performance was observed. The tapping of silicon was greatly hampered by abundant slag clumps (see Fig. 4). Over the next two days (8 hours

Table 7
Parameters of the reduction smelting process in conditions of Tau-Ken Temir LLP

Таблица 7

**Параметры процесса восстановительной плавки в условиях
 ТОО «Tau-Ken Temir»**

Time, h	Number of charge batches per hour	Consumed power, MWh	$I_k, \%$	CE, %
26 December, 2017				
8:48	5.8376	17.7	37	15.4
9:48	3.976	18.1	38	-23.1
10:48	8.964	18.3	38	71.4
11:48	4.074	18.6	43	-23.3
12:48	3.2812	16.1	45	-28.7
13:48	5.951	17.2	49	21.1
14:48	10.104	18	50	96.5
15:48	6.8052	19.2	57	24.1
16:48	6.869	19.7	54	22.0
27 December, 2017				
8:20	7.629	19.8	50	34.9
9:20	6.169	18.1	37	19.3
10:20	5.822	18.7	37	9.0
11:20	6.337	19.7	36.2	12.6
12:20	5.9563	19.7	42	5.8
13:20	6.9817	19.8	42	23.4
14:20	6.4561	19.6	30.7	15.3
15:20	6.342	19.6	28.6	13.3
16:20	6.62	19.7	56.8	17.6
28 December, 2017				
8:50	6.479	19.55	51.6	16.0
9:50	7.734	19.45	60.5	39.2
10:50	5.2443	20	43.4	-8.2
11:50	6.726	18.9	53.5	24.6
12:50	6.9222	16.8	43.7	44.2
13:50	4.6155	19.8	60	-18.4
14:50	7.8447	19.9	60	38.0
15:50	5.6397	19.8	41	-0.3



Table 8

Comparative analysis of various options for conducting the reduction smelting
in conditions of Tau-Ken Temir LLP

Таблица 8

Сравнительный анализ различных вариантов ведения процесса восстановительной
плавки в условиях ТОО «Tau-Ken Temir»

Date	Consumption		The amount of commercial silicon, kg	Consumed power, MWh	W _t , kWh/kg	X _{Si} , %
	The number of charge batches, pcs	Quartz, t				
26 December, 2017	55,862	55.862 * 0.6 = 33.5172	6240	162.9	162.9/6.24 = 26.1	39.89
27 December, 2017	58,313	58.3131 * 0.6 = 34.987	11140	174.7	174.7/6.24 = 15.68	68.22
28 December, 2017	51,2054	51.2054 * 0.6 = 30.7232	10620	154.2	154.2/10.62 = 14.52	74.07

per day), an excess of charge was maintained in the range of 10–40%. Initially, the charge level in the OSF decreased significantly, but later the cavity acquired a stable skeleton, the top became more rigid and less loose, the charge level returned to normal and the charge went into the reaction zone independently without forced treatment. Within 2 days, the furnace was removed from the state of crisis.

6. CONCLUSION

On the basis of our studies, the effect of technological operation mode on the Si reduction parameters in an ore smelting furnace can be considered as having been demonstrated. Increases in silicon extraction of at least 10–15% were achieved by means of ex-

tending the interval between furnace top treatments to 30 min and achieving a balance between material and thermal flows in the furnace. By this means, oscillations in the phase current were stabilised. By maintaining the correct balance, it is possible to quickly rescue an industrial furnace from complex crisis conditions. However, further studies are required for solving the issue of coordinating the top treatment and the tapping of silicon. The further implementation of smelting method with liquid silicon tapped at the end moment of its accumulation at maximum phase current strength appears to be promising. The authors considering all options for collaboration aimed at a further practical implementation of new operational aspects in the production of commercial silicon.

References

1. Andresen B. The Metallurgical Silicon Process Revisited. In: *Silicon for the Chemical and Solar Industry X: Proceedings of the International Conference*. 28 June – 2 July 2010, Ålesund – Geiranger. Ålesund – Geiranger; 2010, p. 11–23.
2. Ringdalen E, Tangstad M. Reaction Mechanisms in Carbothermic Production of Silicon, Study of Selected Reactions. In: *Incorporating the 6th Advances in Sulfide Smelting Symposium: International Smelting Technology Symposium*. 17 March 2012, Florida. Florida; 2012, p. 195–203. 10.1002/9781118364765.ch24
3. Vangskåsen J. Metal-Producing Mechanisms in the Carbothermic Silicon Process. *Unit*. Available from: <https://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/007/7167/masteroppgave.pdf> [Accessed 15th November 2019].
4. Gasik MI, Gasik MM. *Silicon Electrothermy*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine; 2011, 487 p. (In Russ.)
5. Gasik M. *Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013, 536 p.
6. Polyah OA, Rudneva VV, Yakushevich NF, Galevskij

- GV. Production of silicon carbide micro- and nanopowders based on technogenic silica fume. *Vestnik gornometallurgicheskoy sekcii Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Otdelenie metallurgii* = Bulletin of Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Metallurgy. 2014;32:113–121. (In Russ.)
7. Nemchinova NV, Leonova MS, Tyutrin AA. Experimental Works on Pelletized Charge Smelting in Silicon Production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(1):209–217. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-209-217>
8. Yakushevich NF, Galevskij GV, Kovrova OA. Diagram of the Physicochemical Interaction of Silicon Oxide Carbon-Thermal Reduction to Carbide in Acheson's Furnace. In: *Problemy rudnoj elektrotermii "Elektrotermiya – 96": sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskogo soveshchaniya* = Problems of Ore Electrothermy "Electrothermy - 96": Collected reports of the scientific and technical meeting. 4–5 June 1996, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg; 1996, p. 33–37. (In Russ.)
9. Strunskij BM. *Calculations of Ore-Thermal Furnaces*. Moscow: Metallurgiya; 1982, 192 p. (In Russ.)
10. Zobnin NN. Effect of Thermal Stability of Quartz and Granulometric Composition of Charge Materials on the Process of Electrothermal Smelting of Metallurgical Silicon. In: *Cvetnye metally i mineraly – 2017: sbornik dokladov IX Mezhdunarodnogo kongressa* = Non-ferrous Metals and Minerals – 2017: collected reports of the International Congress. 11–15 September 2017, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2017, p. 779–786. (In Russ.)
11. Safonov AA, Mausymbaeva AD, Portnov VS, Parafilov VI, Korobko SV. Analysis of Potential Use of Coal from the Shubarkol Deposit in Technical Silicon Smelting. *Ugol*. 2019;2:68–72. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-2-68-72>
12. Nemchinova NV, Leonova MS, Tyutrin AA, Bel'skii SS. Optimizing the Charge Pelletizing Parameters for Silicon Smelting Based on Technogenic Materials. *Metallurgist*. 2019;63(1–2):115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>
13. Nemchinova NV, Timofeev AK, Salov VM. Effect of Charge Composition on Metallurgical Silicon Smelting Indices in Electric-Arc Furnaces. *Metallurgist*. 2017;60(11):1243–1249. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0435-7>
14. Nemchinova NV, Mineev GG, Tyutrin AA, Yakovleva AA. Utilization of Dust from Silicon Production. *Steel in Translation*. 2017;47(12):763–767. <https://doi.org/10.3103/S0967091217120087>
15. Schei A, Tuset JKr, Tveit H. *Production of High Silicon Alloys*. Trondheim: Tapir; 1998, 363 p.
16. Andresen B. Operational Aspects of the Metallurgical Silicon Process. In: *Silicon for the Chemical and Solar Industry XIII: Proceedings of the International Conference*. 13–16 June 2016, Kristiansand. Trondheim: NTNU; 2016, p. 63–74.
17. Tangstad M. Ferrosilicon and Silicon Technology. In: Gasik M. (eds.). *Handbook of Ferroalloys. Theory and Technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013, p. 179–220. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097753-9.00006-X>
18. Tesfahunegn YA, Magnusson T, Tangstad M, Saevarsdottir G. Effect of Electrode Shape on the Current Distribution in Submerged Arc Furnaces for Silicon Production - A Modelling Approach. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(6):595–600. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a6>
19. Saevarsdottir G, Bakken JA. Current Distribution in Submerged Arc Furnaces for Silicon Metal, Ferrosilicon Production. In: *Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress: Sustainable Future*. 6–9 June 2010, Helsinki. Helsinki; 2010, p. 717–728.
20. Zobnin NN, Torgovec AK, Pikalova IA, Yusupova YuS, Atakishiev SA. Effect of quartz thermal stability and particle size distribution of feed materials on electrothermal smelting of metallurgical silicon. *Vostochnyj zhurnal himii* = East Journal of Chemistry. 2018;34(2):1120–1125. (In Russ.)
21. Ringdalen E, Tangstad M. Softening and Melting of SiO₂, an Important Parameter for Reactions with Quartz in Si Production. In: Reddy R.G., Chaubal P., Pistorius P.C., Pal U. (eds). *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16)*. Springer, Cham, 2016. P. 43–51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_4
22. Ringdalen E. Changes in Quartz during Heating and the Possible Effects on Si Production. *JOM*. 2015;67(2):484–492. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1149-y>
23. Børset MT, Kolbeinsen L, Tveit H, Kjelstrup S. Exergy based efficiency indicators for the silicon furnace. *Energy*. 2015;90(2):1916–1921. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.010>
24. Eryomin VP. High-purity Refined Silicon as a Basis for Multisilicon Production for Solar Energy. In: *Tekhnologiya i oborudovanie rudnotermicheskikh proizvodstv "Elektrotermiya–2008": trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Technology and Equipment of Ore Thermal Production "Electrothermy-2008": Proceedings of All-Russian scientific and practical conference. 3–5 June 2008, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: All-Russian Research Institute of Fats; 2008, p. 204–212. (In Russ.)

Библиографический список

1. Andresen B. The metallurgical silicon process revisited // *Silicon for the Chemical And Solar Industry X: Proceedings of the International Conference* (Ålesund – Geiranger, 28 June – 2 July 2010). Ålesund – Geiranger, 2010. P. 11–23.
2. Ringdalen E., Tangstad M. Reaction Mechanisms in



- Carbothermic Production of Silicon, Study of Selected Reactions // Incorporating the 6th Advances in Sulfide Smelting Symposium: International Smelting Technology Symposium (Florida, 17 March 2012). Florida, 2012. P. 195–203. <https://doi.org/10.1002/9781118364765.ch24>
3. Vangskåsen J. Metal-producing Mechanisms in the Carbothermic Silicon Process / Unit [Электронный ресурс]. URL: <https://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/007/7167/masteroppgave.pdf> (15.11.2019)
4. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Изд-во НМетАУ, 2011. 487 с.
5. Gasik M. Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 536 p.
6. Полях О.А., Руднева В.В., Якушевич Н.Ф., Галевский Г.В. Производство микро- и нанопорошка карбида кремния на основе техногенного микрокремнезема // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2014. № 32. С. 113–121.
7. Немчинова Н.В., Леонова М.С., Тютрин А.А. Экспериментальные работы по плавке окомкованной шихты в производстве кремния // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 1. С. 209–217. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-209-217>
8. Якушевич Н.Ф., Галевский Г.В., Коврова О.А. Схема механизма физико-химического взаимодействия углеродотермического восстановления оксида кремния до карбида в печи Ачесона // Проблемы рудной электротермии «Электротермия – 96»: сб. докл. науч.-техн. совещания (г. Санкт-Петербург, 4–5 июня 1996). Санкт-Петербург, 1996. С. 33–37.
9. Струнский Б.М. Расчеты руднотермических печей. М.: Металлургия, 1982. 192 с.
10. Зобнин Н.Н. Влияние термической стойкости кварца и гранулометрического состава шихтовых материалов на процесс электротермической плавки металлургического кремния // Цветные металлы и минералы – 2017: сб. докл. IX Междунар. конгресса (г. Красноярск, 11–15 сентября 2017 г.). Красноярск: ООО «Научно-инновационный центр», 2017. С. 779–786.
11. Сафонов А.А., Маусымбаева А.Д., Портнов В.С., Парафилов В.И., Коробко С.В. Анализ возможного использования углей месторождения Шубарколь при выплавке технического кремния // Уголь. 2019. № 2. С. 68–72. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-2-68-72>
12. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the Charge Pelletizing Parameters for Silicon Smelting Based on Technogenic Materials // Metallurgist. 2019. Vol. 63. Issue 1–2. P. 115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>
13. Nemchinova N.V., Timofeev A.K., Salov V.M. Effect of Charge Composition on Metallurgical Silicon Smelting Indices in Electric-Arc Furnaces // Metallurgist. 2017. Vol. 60. Issue 11. P. 1243–1249. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0435-7>
14. Nemchinova N.V., Mineev G.G., Tyutrin A.A., Yakovleva A.A. Utilization of Dust from Silicon Production // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. Issue 12. P. 763–767. <https://doi.org/10.3103/S0967091217120087>
15. Schei A., Tuset J.Kr., Tveit H. Production of high silicon alloys. Trondheim: Tapir, 1998. 363 p.
16. Andresen B. Operational Aspects of the Metallurgical Silicon Process // Silicon for the chemical and solar industry XIII: Proceedings of the International Conf. (Kristiansand, 13–16 June 2016). Trondheim: NTNU, 2016. P. 63–74.
17. Tangstad M. Ferrosilicon and Silicon Technology // Handbook of ferroalloys. Theory and Technology / eds. M. Gasik. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. P. 179–220. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097753-9.00006-X>
18. Tesfahunegn Y.A., Magnusson T., Tangstad M., Saevarsdottir G. Effect of electrode shape on the current distribution in submerged arc furnaces for silicon production - A modelling approach // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. Issue 6. P. 595–600. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a6>
19. Saevarsdottir G., Bakken J.A. Current distribution in submerged arc furnaces for silicon metal, ferrosilicon production // Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress: Sustainable Future (Helsinki, 6–9 June 2010). Helsinki, 2010. P. 717–728.
20. Зобнин Н.Н., Торговец А.К., Пикалова И.А., Юсупова Ю.С., Атакишиев С.А. Влияние термостабильности кварца и гранулометрического состава загрузочных материалов на процесс электротермического плавления металлургического кремния // Восточный журнал химии. 2018. Т. 34. № 2. С. 1120–1125.
21. Ringdalen E., Tangstad M. Softening and Melting of SiO₂, an Important Parameter for Reactions with Quartz in Si Production // Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16) / eds. R.G. Reddy, P. Chababal, P.C. Pistorius, U. Pal. Springer, Cham, 2016. P. 43–51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_4
22. Ringdalen E. Changes in Quartz During Heating and the Possible Effects on Si Production // JOM. 2015. Vol. 67. Issue 2. P. 484–492. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1149-y>
23. Børset M.T., Kolbeinsen L., Tveit H., Kjelstrup S. Exergy based efficiency indicators for the silicon furnace // Energy. 2015. Vol. 90. Part 2. P. 1916–1921. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.010>
24. Ерёмин В.П. Высокочистый рафинированный кремний – основа получения мультикремния для солнечной энергетики // Технология и оборудование руднотермических производств «Электротермия–2008»: труды Всерос. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 3–5 июня 2008 г.). Санкт-Петербург: ВНИИЖ, 2008. С. 204–212.

Authorship criteria

Zobnin N.N., Baisanov S.O., Baisanov A.S., Musin A.M. declare equal participation in obtaining and processing of scientific results and are equally responsible for plagiarism.

Conflict of interests

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay N. Zobnin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Metallurgy and Materials Science,
Karaganda State Industrial University,
30 Respubliki Ave., Temirtau 101400, Kazakhstan;
Production Engineer,
Tau-Ken Temir LLP,
accounting quarter 018, bldg 133, Oktyabrsky district,
Karaganda 100018,
Kazakhstan;
✉ e-mail: zobninnn@mail.ru

Sailaubai O. Baisanov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Director,
Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute,
63 Ermekov St., Karaganda 100009, Kazakhstan;
e-mail: hmi2009@mail.ru

Alibek S. Baisanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Laboratory of Pyrometallurgical Processes,
Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute,
63 Ermekov St., Karaganda 100009, Kazakhstan;
e-mail: alibekbaisanov@mail.ru

Azat M. Musin,

Doctoral Student, PhD,
Zh. Abishev Chemical-Metallurgical Institute,
63 Ermekov St., Karaganda 100009, Kazakhstan;
e-mail: mam.9@mail.ru

Критерии авторства

Зобнин Н.Н., Байсанов С.О., Байсанов А.С., Мусин А.М. 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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зобнин Николай Николаевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии и материаловедения,
Карагандинский государственный индустриальный университет,
101400, г. Темиртау, пр. Республики, 30, Казахстан;
инженер производственно-технической службы,
ТОО «Тай-Кен Темир»,
100018, г. Караганда, Октябрьский район,
учетный квартал 018, корп. 133, Казахстан;
✉ e-mail: zobninnn@mail.ru

Байсанов Сайлаубай Омарович,

доктор технических наук, профессор,
директор,
Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева,
100009, Караганда, ул. Ермекова, 63, Казахстан;
e-mail: hmi2009@mail.ru

Байсанов Алибек Сайлаубаевич,

кандидат технических наук, ассоциированный профессор,
заведующий лабораторией пирометаллургических процессов,
Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева,
100009, Караганда, ул. Ермекова, 63, Казахстан;
e-mail: alibekbaisanov@mail.ru

Мусин Азат Мергенович,

докторант PhD,
Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева,
100009, Караганда, ул. Ермекова, 63, Казахстан;
e-mail: mam.9@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.212.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-460-474>

Термодинамические закономерности гидрохимического окисления сульфидных минералов цветных металлов в азотнокислых средах

© Д.А. Рогожников, О.А. Дизер, П.С. Потапов, С.В. Мамяченков

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Резюме: Цель работы – исследовать некоторые физико-химические закономерности гидрохимического окисления сульфидных минералов цветных металлов в азотнокислых средах для установления термодинамической вероятности протекания тех или иных взаимодействий и определения наиболее выгодных условий ведения процессов в заданных режимах. Для оценки возможности протекания тех или иных реакций между азотной кислотой и основными минералами, присутствующими в сульфидном сырье цветных металлов, рассчитаны значения изменений энергии Гиббса и логарифмы констант равновесия реакций при различных температурах процесса. Для наглядного отображения термодинамически устойчивых соединений при изменении окислительных условий изучаемых гетерогенных систем построены диаграммы Пурбэ Eh-pH. Для наиболее точного прогноза получения необходимых продуктов взаимодействия азотной кислоты и исследуемых сульфидных минералов произведены расчеты равновесного распределения компонентов изучаемых систем для жидкой и твердой фаз. Все термодинамические расчеты проводили в программе «HSC Chemistry» (Финляндия). В результате расчетов изменения энергии Гиббса и логарифмов констант равновесия реакций взаимодействия сульфидных минералов с азотной кислотой установлена достаточно большая термодинамическая вероятность их протекания с образованием искомым соединений. Построением диаграмм Пурбэ установлены условия протекания тех или иных взаимодействий и стабильного состояния обнаруживаемых продуктов в широких диапазонах значений потенциалов и pH рассматриваемых гетерогенных систем. Проведенные расчеты равновесного распределения компонентов изучаемых систем дали возможность подтвердить результаты термодинамических расчетов и привязать их к реальным гидрохимическим условиям азотнокислотного выщелачивания по расходу кислоты для получения искомым продуктов. Выполненные исследования позволяют судить о ходе протекающих реакций и образовании тех или иных продуктов при взаимодействии основных компонентов сырья с азотной кислотой с т.зр. термодинамических закономерностей изучаемых процессов.

Ключевые слова: упорные сульфиды, выщелачивание, азотная кислота, термодинамика, диаграммы Пурбэ, равновесное распределение

Информация о статье: Дата поступления 28 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 17 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

Для цитирования: Рогожников В.А., Дизер О.А., Потапов П.С., Мамяченков С.В. Термодинамические закономерности гидрохимического окисления сульфидных минералов цветных металлов в азотнокислых средах. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24 № 2. С. 460–474. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-460-474>

Thermodynamic patterns for hydrochemical oxidation of non-ferrous metal sulphide minerals in nitric acid media

Denis A. Rogozhnikov, Oleg A. Dizer, Pavel S. Potapov, Sergey V. Mamyachenkov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The paper represents the results of studying certain physicochemical patterns occurring during hydrochemical oxidation of non-ferrous metal sulphide minerals in nitric acid media. The study was aimed at establishing the thermodynamic probability of the occurrence of particular interactions and determining the most favourable conditions for effecting processes in given modes. Changes in the Gibbs energy and the logarithm of the reaction equilibrium constants at various process temperatures are calculated to assess the possibility of various reactions between nitric acid and the main minerals present in sulphide raw materials of non-ferrous metals. For the purpose of visualising thermodynamically stable compounds when changing the oxidising conditions of the studied heterogeneous systems, Purbe Eh-pH diagrams were

constructed. In order to obtain most accurate prediction of obtaining the necessary interaction products of nitric acid and the studied sulphide minerals, the equilibrium component distribution was calculated for liquid and solid phases of the studied systems. All thermodynamic calculations were performed using the HSC Chemistry software (Finland). As a result of calculations for the Gibbs energy change and the logarithms of the interaction equilibrium constants of sulphide minerals with nitric acid, the significant thermodynamic probability of the reaction occurrence with the formation of the desired compounds is established. By constructing the Pourbaix diagrams, the necessary conditions for the occurrence of certain interactions and stable state of the detected products across a wide range of potentials and pH values of the heterogeneous systems under consideration are established. The calculations of the component equilibrium distribution in the studied systems confirmed the results of the thermodynamic calculations, relating them to the real hydrochemical conditions of nitric acid leaching in terms of acid consumption for obtain the desired products. The performed study allows an assessment of the reaction progress and the formation of certain products during the interaction of the raw material main components with nitric acid carried out from the perspective of thermodynamic patterns.

Keywords: refractory sulfides, leaching, nitric acid, thermodynamics, Pourbaix diagram, equilibrium distribution

Information about the article: Received February 28, 2020; accepted for publication March 17, 2020; available online April 30, 2020.

For citation: Rogozhnikov VA, Dizer OA, Potapov PS, Mamyachenkov SV. Thermodynamic patterns for hydrochemical oxidation of non-ferrous metal sulphide minerals in nitric acid media. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):460–474. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-460-474>

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данных исследований заключается в необходимости поиска новых способов переработки низкосортных упорных материалов, содержащих сульфидные минералы цветных металлов, в т.ч. золотосодержащих, т.к. вследствие истощения запасов руд богатых полезными ископаемыми и ухудшения качества перерабатываемого сырья действующие технологии не могут быть эффективными и рентабельными как с экономической, так и экологической точек зрения [1–7]. Даже современные высокоинтенсивные методы, такие как сверхтонкое измельчение, бактериальное выщелачивание, высокотемпературное автоклавное окисление, не всегда позволяют достигать приемлемых показателей на конкретных объектах¹ [8–18].

В настоящее время известно значительное количество месторождений, содержащих значительные количества ценных компонентов – золота и других благородных металлов, но состоящих из различных упорных соединений, в которых ценные металлы находятся в труднодоступном виде: наноразмерное золото, тонкая вкрапленность в сульфидную матрицу, наличие в

составе руды высокотоксичных соединений и т.д. [19–23].

С учетом вышесказанного особую научную значимость приобретает поиск способов вскрытия подобных упорных материалов и дальнейшего выделения цветных и благородных металлов с целью сокращения их потерь на различных стадиях технологического процесса.

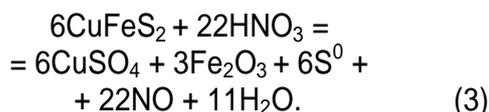
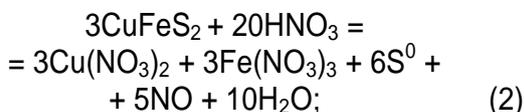
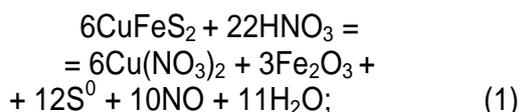
Известно, что азотная кислота является эффективным окислителем и реагентом для выщелачивания вследствие того, что обладает высокими тепловым эффектом и скоростью реакций окисления, обеспечивает нагрев раствора за счет тепла экзотермических реакций и полноту извлечения ценных металлов в раствор без использования дополнительных реагентов. Образующиеся при взаимодействии сульфидов и азотной кислоты нитрозные газы могут улавливаться с дальнейшей регенерацией азотной кислоты [24–27].

Химизм протекающих реакций. Взаимодействие сульфидов с азотной кислотой может протекать с образованием водорастворимых, твердых и газообразных продуктов, в суммарном виде представляемых многообразием химических реакций. При этом для одних и тех же минералов

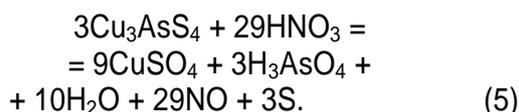
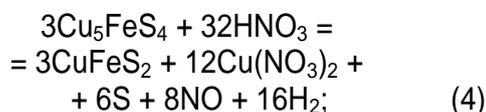
¹Котляр Ю.А., Меретуков А.С., Стрижко Л.С. *Металлургия благородных металлов: учебник*. М.: МИСИС, 2005. 432 с.



может протекать одновременно несколько конкурирующих реакций, как, например, для халькопирита:

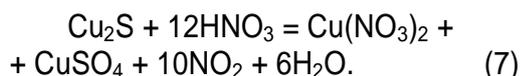
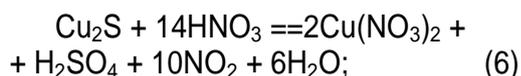


Взаимодействие других первичных минералов меди, например, борнита и энаргита, может протекать следующим образом:

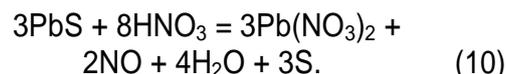
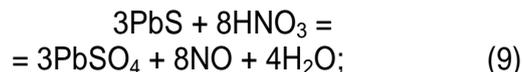
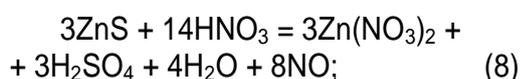


Преобладание той или иной реакции будет зависеть от условий проведения процесса, вида и состава исходного концентрата и т.д.

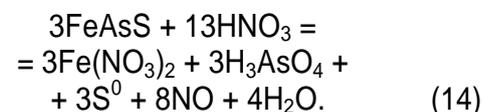
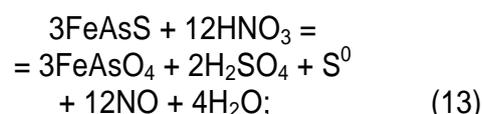
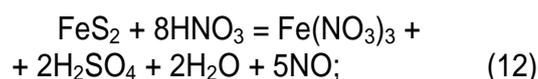
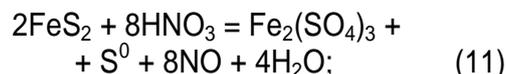
В свою очередь вторичные медные сульфиды могут реагировать с азотной кислотой по следующим реакциям:



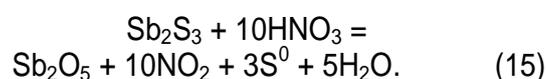
Схожим образом могут протекать реакции взаимодействия сфалерита и галенита с азотной кислотой:



Железосодержащие минералы, такие как пирит, арсенопирит и пирротин, могут реагировать с азотной кислотой по следующим реакциям:



Несколько иначе ведет себя в этих условиях стибнит, образуя плохо растворимые оксиды и элементарную серу, которые могут оказывать негативное влияние как на окисление других сульфидов, так и препятствовать в дальнейшем извлечению золота:



Для определения механизма образования тех или иных продуктов, их взаимного влияния при окислении сульфидов, возможности и условий образования новых фаз необходимо, кроме химизма, изучить термодинамические закономерности протекающих процессов.

2. РАСЧЕТЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ГИББСА И КОНСТАНТ РАВНОВЕСИЯ

Для оценки термодинамической вероятности вышеперечисленных реакций, определения их направления и полноты протекания рассчитаны важнейшие термо-

динамические характеристики – значения изменений энергии Гиббса (ΔG , кДж/моль) (табл. 1) и логарифмы констант равновесия (K_p) (табл. 2). Расчет этих величин произведен для температур 20, 50 и 90°C, охватывающих требуемый, по нашему мнению, интервал для протекания изучаемых процессов. В расчетах использовали справочные данные термодинамических величин, а также программный комплекс «HSC Chemistry».

Таким образом, в результате выполненных расчетов для приведенных реакций

взаимодействия сульфидных минералов с азотной кислотой установлена достаточно высокая термодинамическая вероятность их протекания с образованием элементарной серы, водорастворимых нитратов и сульфатов металлов, для мышьяксодержащих минералов – арсенатов и мышьяковистой кислоты, нитрозных газов с различной степенью окисления азота. На практике необходимо определить условия равновесного существования указанных соединений при максимально возможном давлении нежелательных реакций.

Таблица 1

Изменения энергии Гиббса, кДж/моль

Table 1

Gibbs energy variations, kJ/mol

Температура, °C	Номер реакции							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20	-1697,6	-1097,3	-3968,1	-596,5	-655,1	-349,3	-1754,4	-1549,2
50	-1711,6	-1078,1	-4037,9	-627,8	-648,0	-353,9	-1781,0	-1577,6
90	-1724,9	-1046,4	-4129,2	-666,8	-633,5	-359,3	-1815,7	-1614,7
Температура, °C	Номер реакции							
	9	10	11	12	13	14	15	
20	-2480,9	-951,8	-936,3	-988,0	-487,6	-1549,2		-128,9
50	-2522,9	-961,4	-941,3	-1037,6	-478,8	-1577,6		-137,7
90	-2578,0	-972,8	-946,1	-1100,9	-464,8	-1614,7		-149,1

Таблица 2

Результаты расчетов логарифмов констант равновесия

Table 2

Results of equilibrium constant logarithm calculation

Температура, °C	Номер реакции							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20	302,5	195,5	308,0	106,2	116,7	260,4	308,0	169,6
50	276,7	174,2	308,0	101,4	104,7	239,3	287,9	155,4
90	248,1	150,5	308,0	95,9	91,1	216,2	261,2	139,9
Температура, °C	Номер реакции							
	9	10	11	12	13	14	15	
20	96,1	276,0	308,0	176,0	86,8	276,0		166,8
50	93,1	255,0	308,0	167,7	77,4	255,0		147,8
90	89,7	232,2	308,0	158,3	66,8	232,2		136,0



3. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ ПУРБЭ

В условиях равновесия система имеет свой определенный окислительный потенциал, его зависимость от концентрации ионов H^+ выражается диаграммами Пурбэ Eh–рН, позволяющей определить состояние равновесия этой системы.

Для определения эффективных условий протекания тех или иных взаимодействий и образования искоемых продуктов в реальных условиях приведенные минералы были разделены на несколько групп – медно-мышьяковистые (рис. 1), железомедные (рис. 2), железо-мышьяковистые (рис. 3) и свинцово-цинковые (рис. 4).

Диаграмма, представленная на рис. 1, показывает, что при потенциале $-0,9$ В халькопирит начинает диссоциировать с образованием вторичного сульфида меди Cu_2S и FeS_2 . Окисление энаргита происходит при значении окислительно-восстановительного потенциала $0,5$ В с об-

разованием CuS и As_2S_3 при рН менее 6. При этом при более высоком значении рН возможно образование оксидов меди Cu_2O (Eh от $0,2$ до $0,5$ В) и CuO (Eh более $0,5$ В). Далее с повышением потенциала сера из промежуточных сульфидных минералов окисляется до сульфатной SO_4^{-2} , мышьяк из As (III) окисляется до As (V) в виде мышьяковистой кислоты, медь в свою очередь переходит в катионную форму Cu^{+2} . При рН более 6 медь может находиться в виде оксида CuO .

Анализ диаграммы, представленной на рис. 2, показывает, что при окислительно-восстановительном потенциале системы $-0,5$ В халькопирит и кубанит начинают разлагаться с образованием Cu_2S и FeS ; последний, в свою очередь, идентифицируется в узком интервале Eh $0,2-0,25$ В во всем рассматриваемом диапазоне рН, далее переходя в Fe_3O_4 и Fe_2O_3 . При высоких значениях рН также вероятно образование оксидных форм меди.

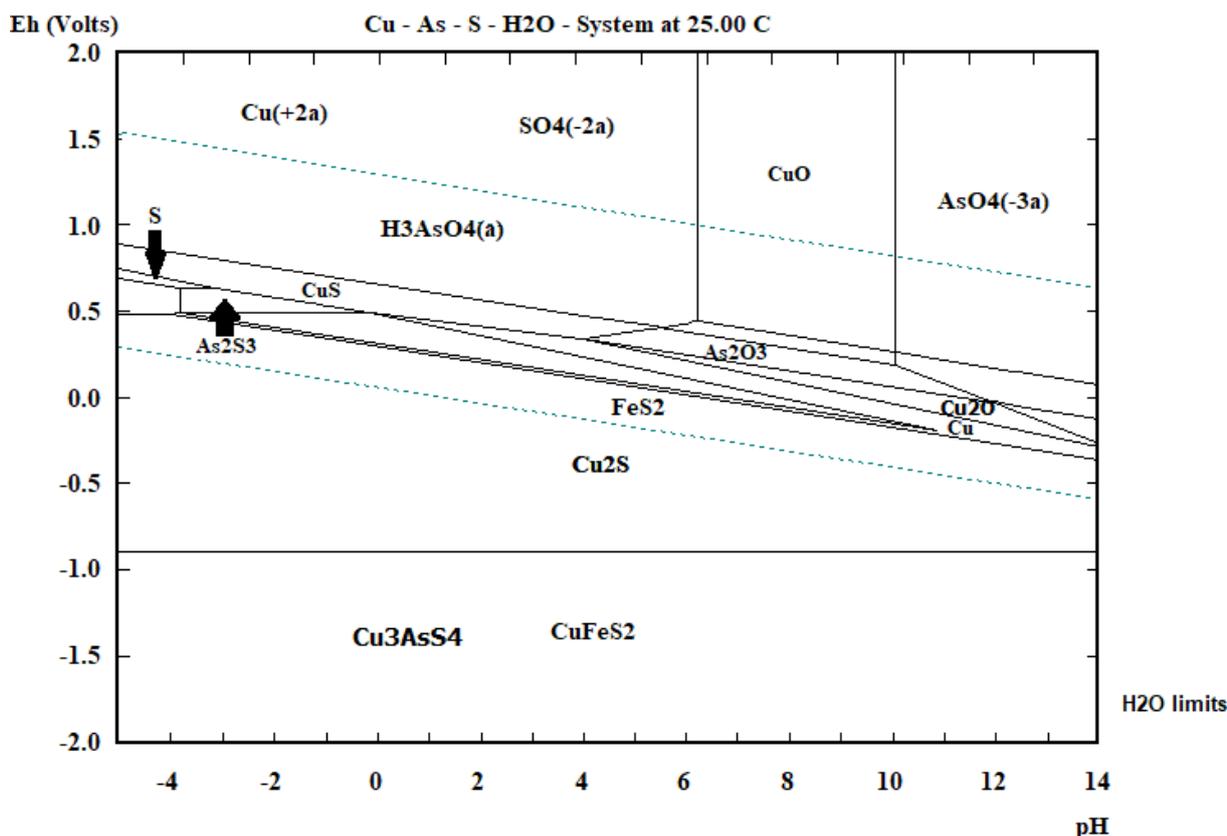


Рис. 1. Общая диаграмма Пурбэ для сульфидных минералов меди и мышьяка
Fig. 1. General Pourbaix diagram for copper and arsenic sulfide minerals

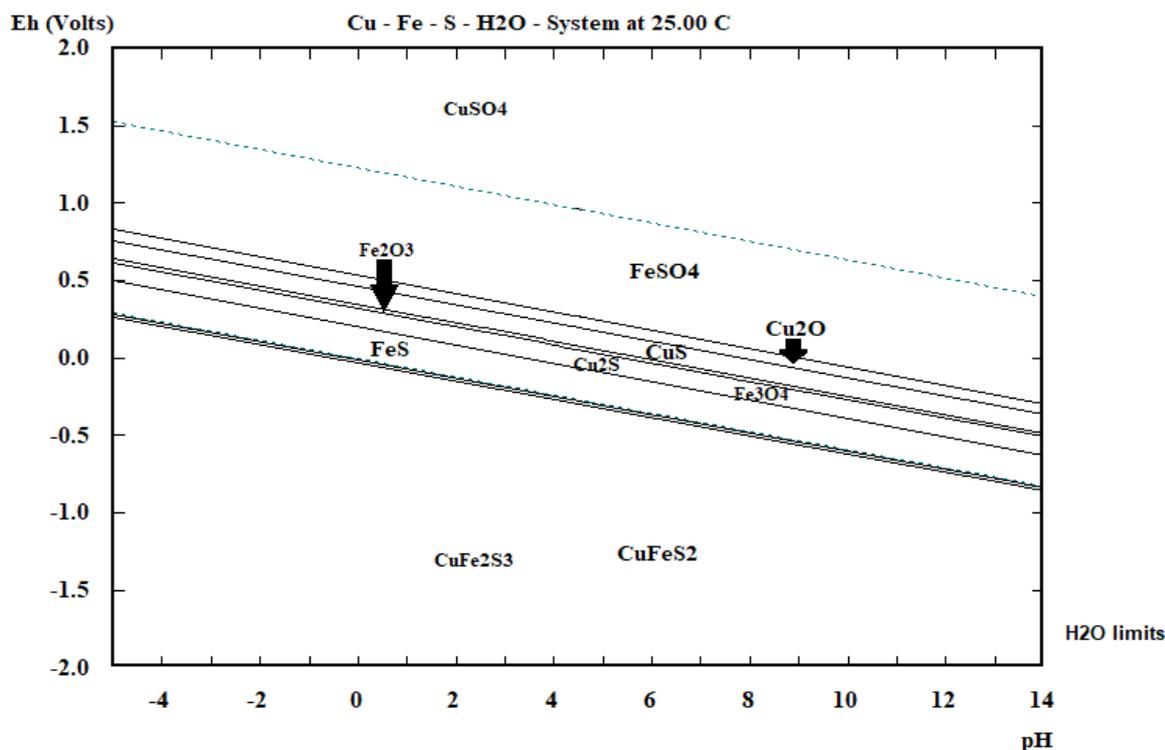


Рис. 2. Общая диаграмма Пурбэ для сульфидных минералов меди и железа
 Fig. 2. General Pourbaix diagram for copper and iron sulfide minerals

С дальнейшим увеличением Eh сера переходит в сульфатную форму, металлы, соответственно, в катионную во всем рассматриваемом интервале pH.

На рис. 3 видно, что при окислении арсенопирита происходит его диссоциация с образованием промежуточных сульфидных соединений железа и мышьяка при потенциале выше -1,0 В, при этом FeS обнаруживает себя лишь в узком интервале Eh от -1,0 до -0,7 В, затем диссоциируя до FeS₂. В свою очередь As₂S₃ (продукт диссоциации арсенопирита) стабилен при Eh -0,3–0 В.

При значениях pH = 5–1 мышьяк находится в форме As₂O₃, при более высоких значениях pH – в виде арсената железа (II). В этих же условиях обнаруживает себя FeSO₄. При потенциале системы >0,7 В железо окисляется до Fe (III) с образованием соответствующих арсенатов и сульфатов.

Совместная диаграмма существования соединений цинка и свинца показывает, что галенит при потенциале выше 0,5 В для высоких значений pH сразу переходит в сульфатную нерастворимую форму.

Сфалерит же при pH более 6 первоначально переходит в ZnO. При pH менее 6 и потенциале от -0,2 В цинк представлен в катионной водорастворимой форме.

Как видно из полученных диаграмм Пурбэ, для получения искоемых соединений при азотнокислотном выщелачивании рассматриваемых сульфидных минералов необходимо придерживаться достаточно высоких значений окислительно-восстановительного потенциала не менее 0,7 В в кислых средах для исключений образования оксидных нерастворимых форм соответствующих элементов.

4. РАСЧЕТЫ РАВНОВЕСНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИЗУЧАЕМЫХ СИСТЕМ

Для наиболее точного предсказания получения необходимых продуктов взаимодействия азотной кислоты и исследуемых сульфидных минералов произведены расчеты равновесного распределения компонентов изучаемых гетерогенных систем в программе «HSC Chemistry».

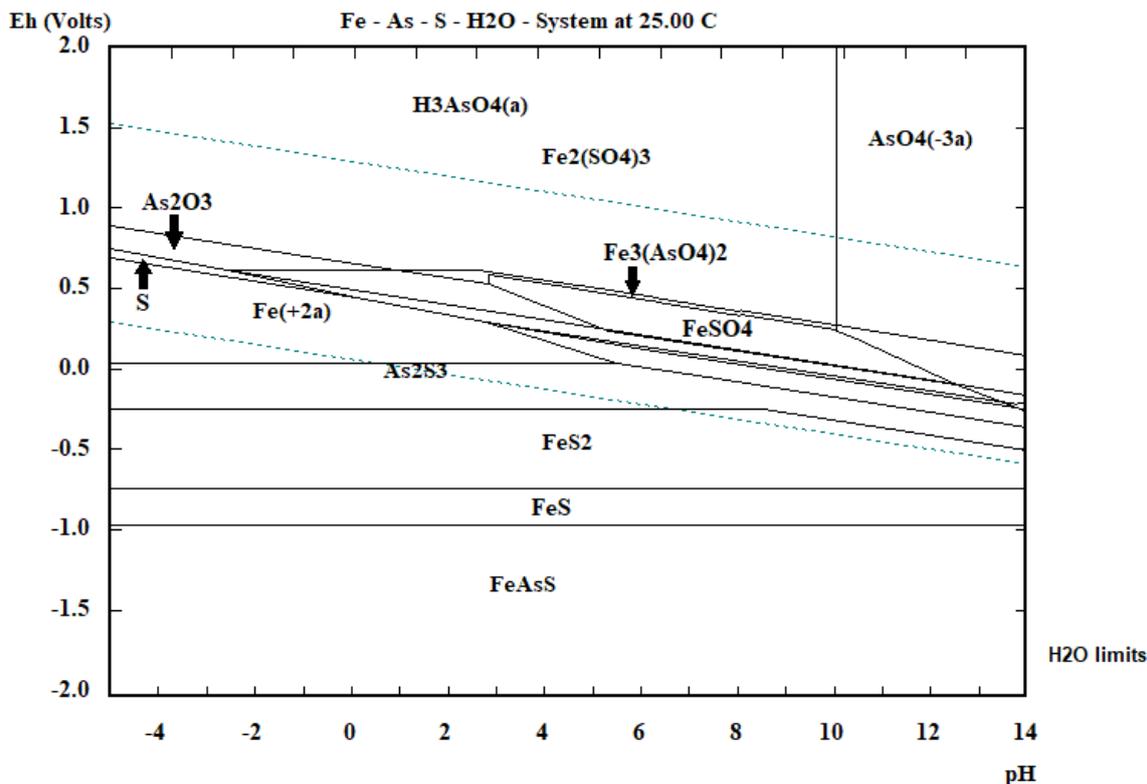


Рис. 3. Общая диаграмма Пурбэ для сульфидных минералов железа и мышьяка
Fig. 3. General Pourbaix diagram for iron and arsenic sulfide minerals

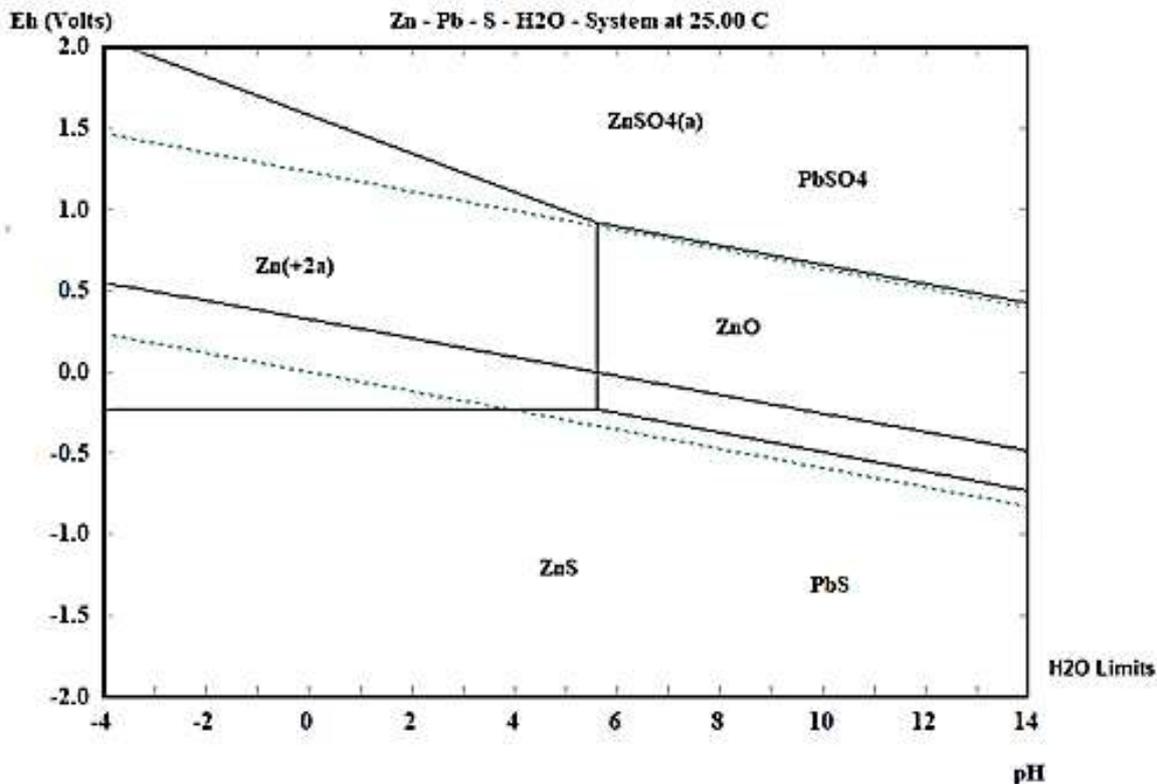


Рис. 4. Общая диаграмма Пурбэ для сульфидных минералов цинка и свинца
Fig. 4. General Pourbaix diagram for zinc and lead sulfide minerals

На рис. 5 и 6 представлены диаграммы равновесного распределения основных минералов железа при азотнокислотном выщелачивании, соответственно, в твердой и жидкой фазах. Арсенопирит в первую очередь диссоциирует уже при начальном повышении кислотности среды до значения 1 М. Одновременно с этим происходит увеличение содержания пирита, образуемого при разложении арсенопирита, однако по достижении некоторого минимального количества последнего (1 М HNO_3) содержание пирита начинает снижаться, что говорит о достижении системы необходимой кислотности для начала диссоциации пирита. Содержание халькопирита начинает уменьшаться только при 3,5 М HNO_3 .

Эти данные подтверждаются результатами расчетов для этих компонентов в жидкой фазе (рис. 6). До содержания азотной кислоты 1 М происходит постепенное накопление в системе Fe_2O_3 и мышьяковистой кислоты – продуктов диссоциации арсенопирита. По завершении данного

процесса при содержании азотной кислоты более 1 М и с началом разложения пирита происходит постепенное накопление FeSO_4 .

Далее, достигнув определенной концентрации азотной кислоты при ее содержании 5,5 М, Fe (II) переходит в форму Fe (III) с образованием соответствующих сульфатов и нитратов.

Возможно, по мере насыщения системы соединениями Fe (III), в интервале значений HNO_3 6–7 М происходит незначительное повышение содержания Fe_2O_3 по реакциям (1), (3), связанное, вероятно, с насыщением жидкой фазы продуктами разложения сульфидов железа и практически полным растворением FeS_2 . Однако далее с повышением кислотности среды в системе вновь преобладают соединения Fe (III).

Рис. 7 и 8 показывают равновесное распределение сульфидных минералов меди, цинка и свинца при азотнокислотном выщелачивании в твердой и жидкой фазах, соответственно.

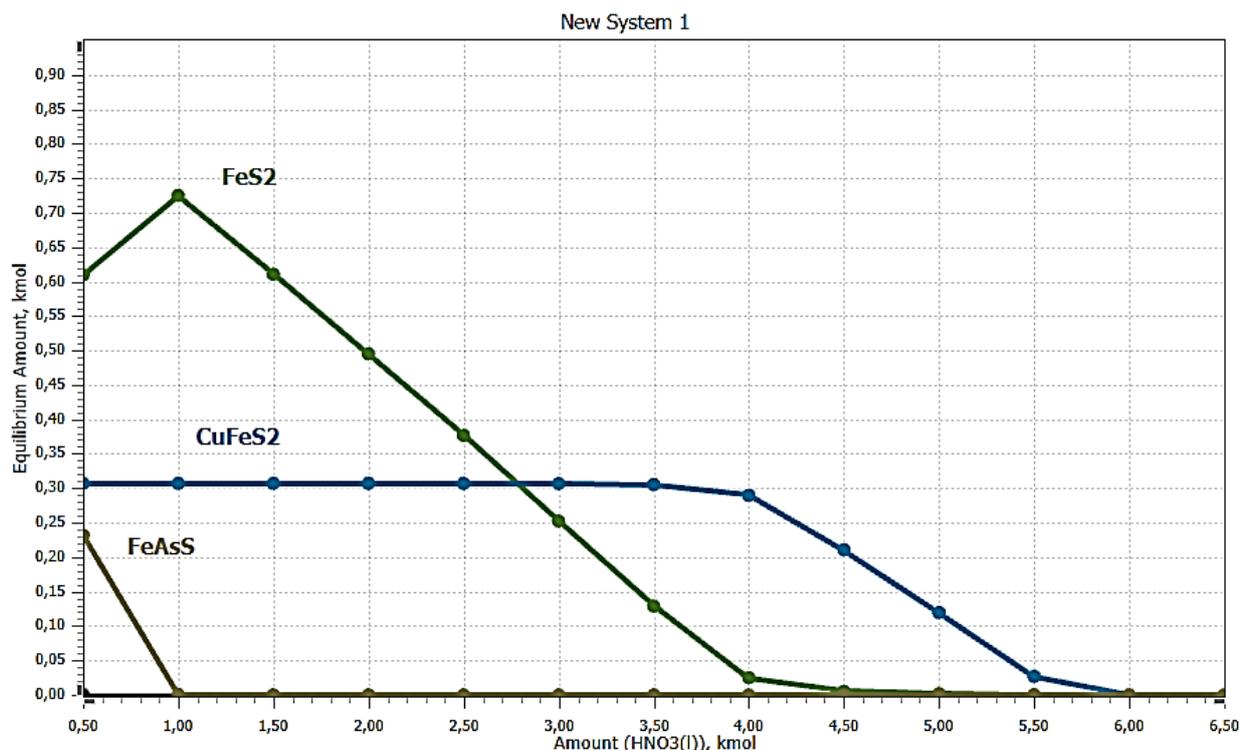


Рис. 5. Диаграмма равновесного распределения основных минералов железа в твердой фазе

Fig. 5. Diagram of equilibrium distribution of main iron minerals in solid phase

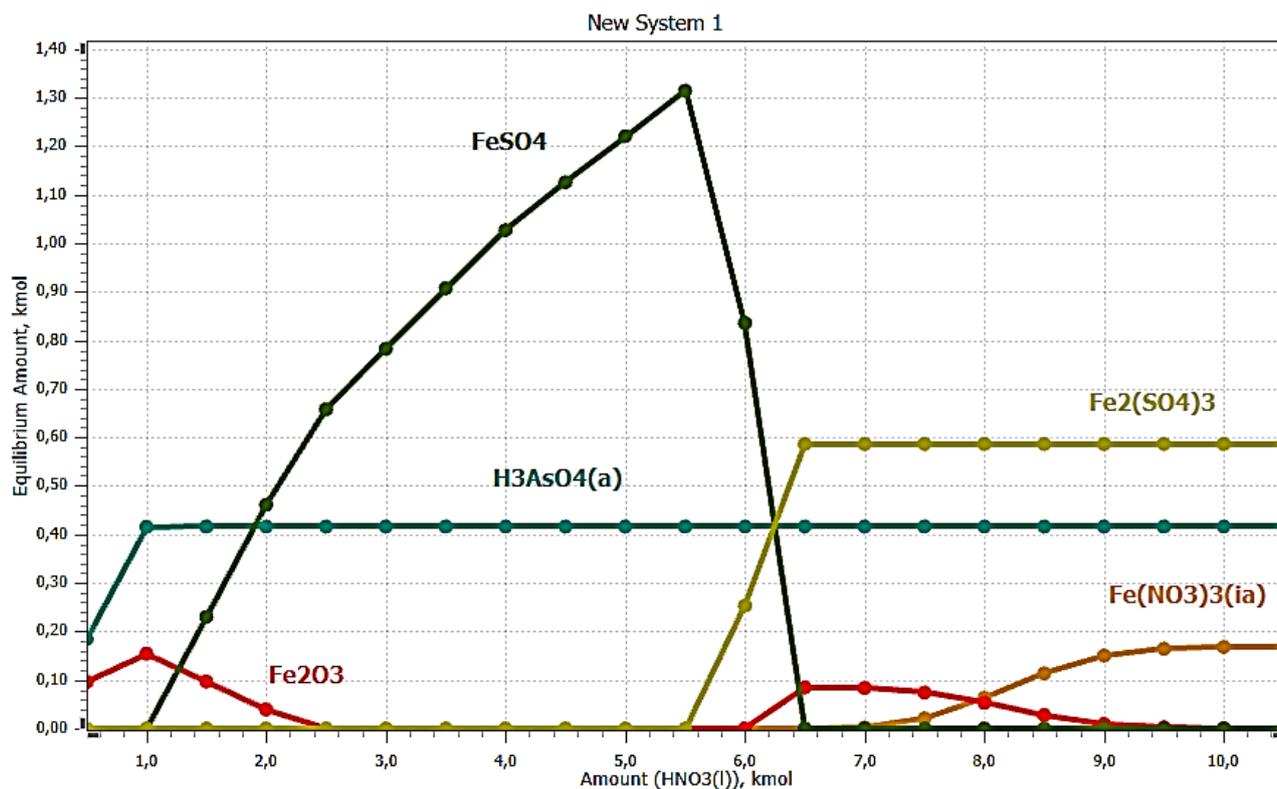


Рис. 6. Диаграмма равновесного распределения минералов железа в жидкой фазе
Fig. 6. Diagram of equilibrium distribution of iron minerals in liquid phase

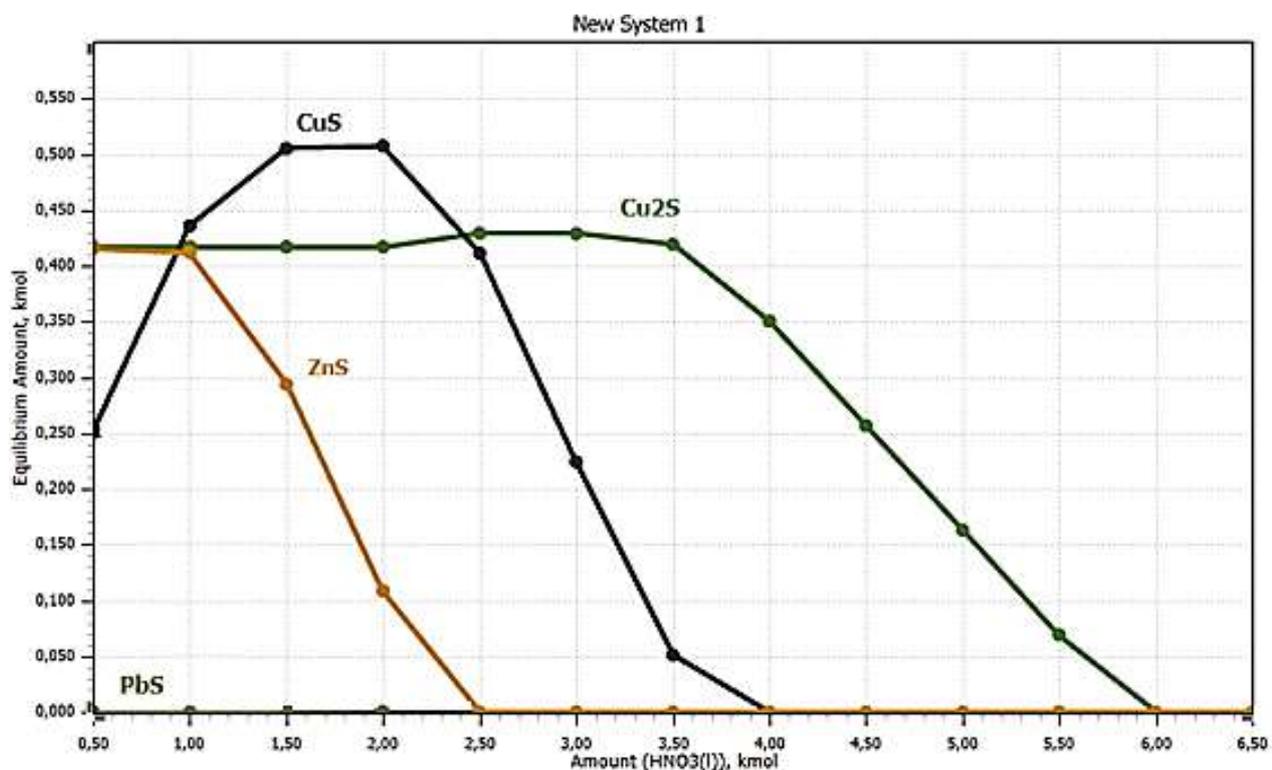


Рис. 7. Диаграмма равновесного распределения минералов меди, цинка и свинца в твердой фазе
Fig. 7. Diagram of equilibrium distribution of copper, zinc, and lead minerals in solid phase

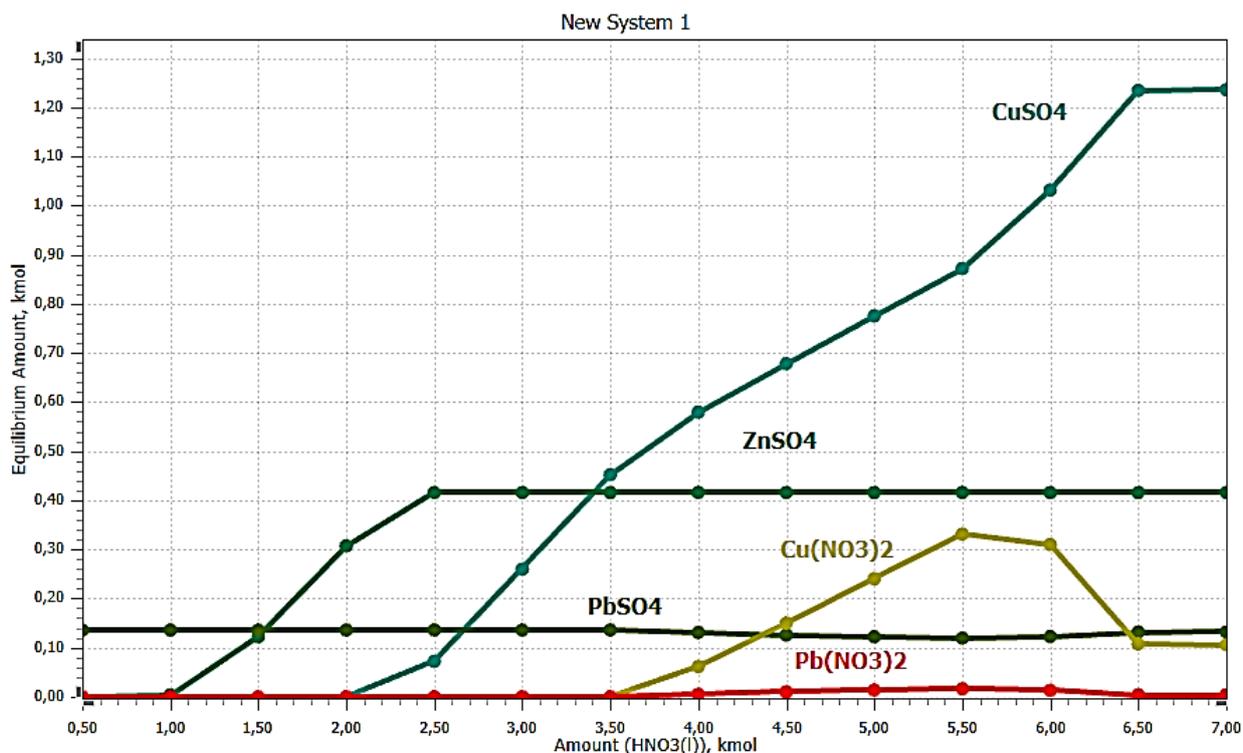


Рис. 8. Диаграмма равновесного распределения минералов меди, цинка и свинца в жидкой фазе
 Fig. 8. Diagram of equilibrium distribution of copper, zinc, and lead minerals in liquid phase

Как видно из представленных расчетных данных, сфалерит начинает разлагаться при 1 М HNO₃ с образованием соответствующего сульфата, который достигает некоторого предельного значения при 2,5 М HNO₃.

Первым из медных минералов начинает диссоциировать ковеллин (2 М HNO₃), и одновременно с этим на диаграмме жидкой фазы начинает образовываться CuSO₄. Халькозин более устойчив в рассматриваемых средах и разлагается лишь при достижении содержания азотной кислоты 3,5 М, и в соответствии с реакциями (6), (7) образуется нитрат меди (II). Вероятно, некоторое предельное значение содержания Cu(NO₃)₂ на диаграмме (5,5 М HNO₃) связано с высоким содержанием азотной кислоты в системе и перераспределением катионов Cu (II) между сульфатной и нитратной составляющими.

Исходное содержание галенита в системе невысоко, он сразу же начинает разлагаться с образованием нерастворимого PbSO₄ и растворимого Pb(NO₃)₂ по реакциям (9), (10), однако согласно выполнен-

ным термодинамическим расчетам (ΔG , K_p) более вероятной является реакция с образованием PbSO₄, что подтверждается диаграммой, представленной на рис. 8.

На рис. 9, 10 представлены результаты расчетов равновесного распределения сульфидных минералов мышьяка и сурьмы при азотнокислотном выщелачивании в твердой и жидкой фазах, соответственно.

Самым первым начинает диссоциировать арсенопирит с образованием арсената железа. При практически полном разложении арсенопирита и насыщении жидкой фазы арсенатом железа (2 М HNO₃) начинается диссоциация энгерита с образованием мышьяковистой кислоты по реакции (5).

Наиболее стойкий из представленных минералов – стибнит – остается в системе до достижения значения количества азотной кислоты 5 М. Далее с повышением кислотности он начинает разлагаться с образованием соответствующих оксидов по реакции (15).

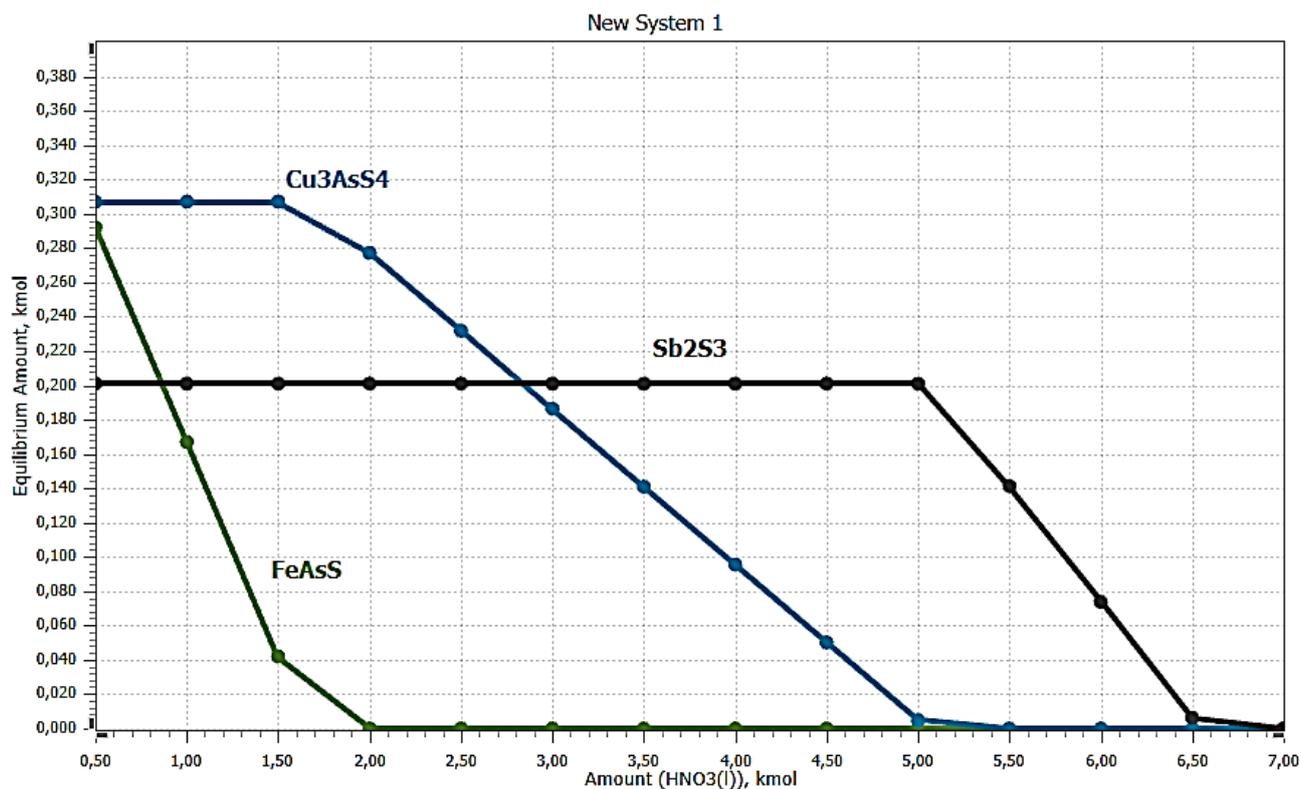


Рис. 9. Диаграмма равновесного распределения минералов мышьяка и сурьмы в твердой фазе
Fig. 9. Diagram of equilibrium distribution of arsenic and antimony minerals in solid phase

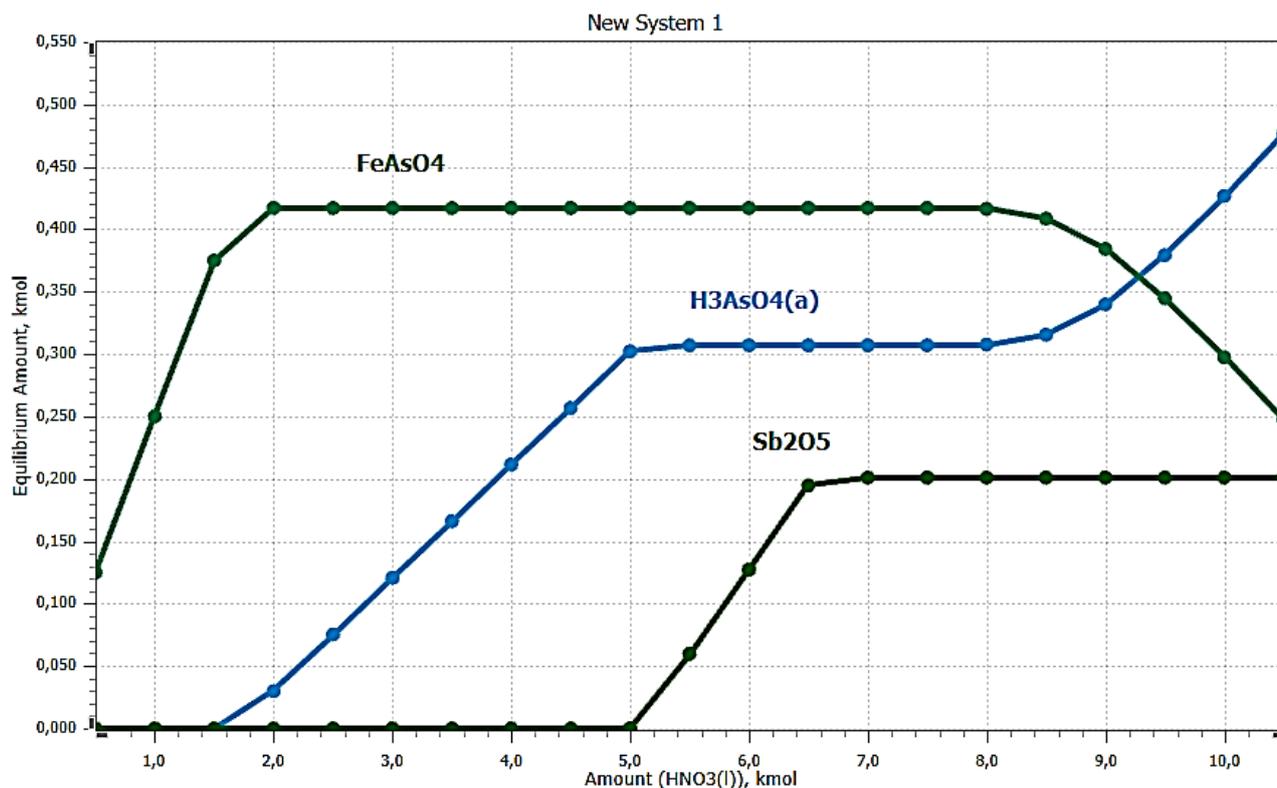


Рис. 10. Диаграмма равновесного распределения минералов мышьяка и сурьмы в жидкой фазе
Fig. 10. Diagram of equilibrium distribution of arsenic and antimony minerals in liquid phase

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разнообразие минералогического состава исследуемого упорного сульфидного сырья цветных металлов не дает однозначного ответа относительно хода протекающих реакций и образования тех или иных продуктов при взаимодействии основных компонентов сырья с азотной кислотой.

Для физико-химического обоснования прохождения реакций и выяснения механизма образования искомым соединений в данной работе приведены:

– закономерности гидрохимического окисления основных сульфидных минералов изучаемого сырья в азотнокислых средах;

– рассчитанные важнейшие термодинамические характеристики данных взаимодействий: изменения энергии Гиббса, логарифмы констант равновесия для температур 20, 50 и 90°C, что позволило выявить наиболее вероятные из них с термо-

динамической точки зрения;

– построенные диаграммы Пурбэ в широких диапазонах значений потенциалов и рН рассматриваемых гетерогенных систем;

– установленные условия протекания тех или иных взаимодействий и стабильного состояния обнаруживаемых продуктов;

– расчеты равновесного распределения компонентов изучаемых систем, которые дали возможность подтвердить результаты термодинамических расчетов и привязать их к реальным гидрохимическим условиям азотнокислотного выщелачивания по ее расходу для получения искомым продуктов.

Полученные результаты термодинамических расчетов позволяют установить условия проведения реальных процессов азотнокислотного выщелачивания сульфидных минералов цветных металлов и получить исходные данные для проведения экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: монография. В 2 т. Т. 1. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 342 с.
2. Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 2. С. 204–218.
3. Jian Liu, Shuming Wen, Dan Liu, Mengyang Lv, Lijun Liu. Response surface methodology for optimization of copper leaching from a lowgrade flotation middling // Mining, Metallurgy & Exploration. 2011. Vol. 28. P. 139–145. <https://doi.org/10.1007/bf03402246>
4. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – A review // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 115-116. P. 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>
5. Willner J., Fornalczyk A., Cebulski J., Janiszewski K. Preliminary Studies on Simultaneous Recovery of Precious Metals from Different Waste Materials by Pyrometallurgical Method // Archives of Metallurgy and Material. 2014. Vol. 59. No. 2. P. 801–804. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0136>
6. Yunji Ding, Shengen Zhang, Bo Liu, Huandong Zheng, Chein-chi Chang, Ekberg Ch. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: a review // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 141. P. 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.041>
7. Жмурова В.В., Немчинова Н.В., Васильев А.А.

Гидрохимическая очистка от меди и свинца золото-содержащих катодных осадков // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 64–74. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

8. Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. М.: Metallurgia, 1991. 415 с.
9. Набойченко С.С., Шнеерсон Я.М., Калашникова М.И., Чугаев Л.В. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов: монография / под ред. С.С. Набойченко. Т. 2. Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2009. 612 с.
10. 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>
11. Paphane B.D., Nkoane B., Oyetunjit O.A. Kinetic studies on the leaching reactions in the autoclave circuit of the Tati Hydrometallurgical Demonstration Plant // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2013. Vol. 113. No. 6. P. 485–489.
12. Hourn M. Refractory leaching solutions // Australian Mining. 2009. Vol. 101. No. 2. P. 20.
13. Шнеерсон Я.М., Набойченко С.С. Тенденции



развития автоклавной гидрометаллургии цветных металлов // Цветные металлы. 2011. № 3. С. 15–20.

14. Dreisinger D. Hydrometallurgical process development for complex ores and concentrates // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2009. Vol. 109. P. 253–271.

15. Мязин В.П., Шуმიлова Л.В., Минеев Г.Г., Баранов В.В. Переработка упорных сульфидных концентратов, содержащих благородные металлы, на основе бактериального окисления // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. № 4. С. 67–78. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-4-67-78>

16. Аксёнов А.В., Васильев А.А. Сверхтонкое измельчение и атмосферное окисление как альтернативный способ вскрытия тонко вкрапленного золота из упорного сульфидного сырья // Инновационные процессы в технологиях комплексной переработки минерального и нетрадиционного сырья (Плаксинские чтения): материалы междунар. совещания (г. Новосибирск, 5–10 октября 2009 г.). Новосибирск, 2009. С. 100–101.

17. Жмурова В.В., Немчинова Н.В., Минеев Г.Г. Кислотное выщелачивание примесей золотосодержащего катодного осадка // Цветные металлы. 2017. № 7. С. 41–46. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.07>

18. Набиулин Р.Н., Богородский А.В., Баликов С.В., Емельянов Ю.Е. Атмосферное окисление золотомедного флотоконцентрата // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2017. Т. 10. Issue 1. С. 139–147. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0013>

19. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. 452 с.

20. Palenik C.S., Utsunomiya S., Reich M., Kesler S.E., Ewing R.C. «Invisible» gold revealed: direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit // American Mineralogist. 2004. Vol. 89. P. 1359–1366.

21. Yang Sixue, Blum S., Rahders E., Zhang Zhenru. The nature of invisible gold in sulfides from Xiangxi Au-Sb-W ore deposit in Northwestern Hunan, People's Republic of China // The Canadian Mineralogist. Vol. 36. 1998. P. 1361–1372.

22. Simon G., Kesler S.E., Chryssoulis S.L. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada; implications for deposition of gold in carlin-type deposits // Economic Geology. 1999. Vol. 94. Issue 3. P. 405–421. <http://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.3.405>

23. Fleet M.E., Mumin A.H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis // American Mineralogist. 1997. Vol. 82. No. 1-2. P. 182–193. <https://doi.org/10.2138/am-1997-1-220>

24. Rogozhnikov D.A., Shoppert A.A., Dizer O.A., Karimov K.A., Rusalev R.E. Leaching Kinetics of Sulfides from Refractory Gold Concentrates by Nitric Acid // Metals. 2019. Vol. 9. P. 465. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/4/465> (17.11.2019). <https://doi.org/10.3390/met9040465>

25. Dizer O.A., Rogozhnikov D.A., Naboichenko S.S. Hydrochemical Investigation of Dissolving Sulfide Gold-Bearing Raw Material of Uderey Deposit // Materials Science Forum. 2019. Vol. 946. P. 535–540. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scientific.net/MSF.946.535> (17.11.2019). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.535>

26. Филиппов А.П., Нестеров Ю.В. Редокс-процессы и интенсификация выщелачивания металлов. М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2009. 543 с.

27. Самихов Ш.Р., Зинченко З.А., Холов Х.И. Азотнокислотная технология вскрытия упорных золото-, медно-, мышьяковых концентратов месторождения Тарор // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2016. № 4. С. 26–32.

References

1. Lodeishchikov VV. *Technology of Gold and Silver Extraction from Refractory Ores*. In 2 vol. Vol. 1. Irkutsk: Irgiredmet; 1999, 342 p. (In Russ.)

2. Komogortsev BV, Varenichev AA. The Problems of Processing Poor and Insistent Gold-Bearing Ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*=Mining Informational and Analytical Bulletin. 2016;2:204–218. (In Russ.)

3. Jian Liu, Shuming Wen, Dan Liu, Mengyang Lv, Lijun Liu. Response Surface Methodology for Optimization of Copper Leaching from a Lowgrade Flotation Middling. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2011;28:139–145. <https://doi.org/10.1007/bf03402246>

4. Syed S. Recovery of Gold from Secondary Sources – A Review. *Hydrometallurgy*. 2012;115-116:30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>

5. Willner J, Fornalczyk A, Cebulski J, Janiszewski K. Preliminary Studies on Simultaneous Recovery of Precious Metals from Different Waste Materials by Pyro-

metallurgical Method. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014;59(2):801–804. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0136>

6. Yunji Ding, Shengen Zhang, Bo Liu, Huandong Zheng, Chein-chi Chang, Ekberg Ch. Recovery of Precious Metals from Electronic Waste and Spent Catalysts: A Review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;141:284–298. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.041>

7. Zhmurova VV, Nemchinova NV, Vasiliev AA. Removal of Copper and Lead from Gold-Bearing Cathode Deposits by Hydrochemical Treatment. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:67–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

8. Meretukov MA, Orlov AM. *Metallurgy of precious metals. Foreign experience*. Moscow: Metallurgiya; 1991, 415 p.

9. Naboychenko SS, Schneerson YaM, Kalashnikova MI, Chugaev LV. *Pressure Hydrometallurgy of Non-*

Ferrous Metals. Vol. 2. Yekaterinburg: Ural Federal University; 2009, 612 p. (In Russ.)

10. Rakhmanov OB, Aksenov AV, Mineev GG, Nazarov KhM, Karimov MI. Processing of Refractory Gold-Arsenic Flotation Concentrate of Ikkijelon Deposit by Pressure Oxidation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018;22(8):163–172. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-8-163-172>

11. Paphane BD, Nkoane B, Oyetunjit OA. Kinetic Studies on the Leaching Reactions in the Autoclave Circuit of the Tati Hydrometallurgical Demonstration Plant. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013;113(6):485–489.

12. Hourn M. Refractory Leaching Solutions. *Australian Mining*. 2009;101(2):20.

13. Shneerson YaM, Naboychenko SS. Tendencies of Non-Ferrous Metals Autoclave Hydrometallurgy Development. *Tsvetnye Metally*. 2011;3:15–20. (In Russ.)

14. Dreisinger D. Hydrometallurgical Process Development for Complex Ores and Concentrates. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009; 109:253–271.

15. Myazin VP, Shumilova LV, Mineev GG, Baranov VV. Biotechnology-Based Processing of Refractory Sulphide Concentrates Containing Noble Metals. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2017;7(4):67–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-4-67-78>

16. Aksenov AV, Vasiliev AA. Ultrafine Grinding and Atmospheric Oxidation as an Alternative Method for Opening Finely Disseminated Gold from Refractory Sulfide Raw Materials. In: *Innovacionnye processy v tekhnologiyah kompleksnoj pererabotki mineral'nogo i netradicionnogo syr'ya (Plaksin'skie chteniya): materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya* = Scientific Basis and Modern Processes of Complex Processing of Hard-Beneficiation Mineral Raw Materials ("Plaksin's Readings 2009): Proceedings of International Conference. 5-10 October 2009, Novosibirsk. Novosibirsk; 2009, p. 100–101. (In Russ.)

17. Zhmurova VV, Nemchinova NV, Mineev GG. Acid Leaching of Impurities from Gold-Containing Cathode Deposits. *Tsvetnye Metally*. 2017;7:41–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.07>

18. Nabiulin RN, Bogorodsky AV, Balikov SV, Emel-

yanov YE. Atmospheric Oxidation of a Gold-Copper Float Concentrate. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Khimiy* = Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2017;10(1):139–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0013>

19. Zakharov BA, Meretukov MA. *Gold: Refractory Ores*. Moscow: Ore and Metals; 2013, 452 p. (In Russ.)

20. Palenik CS, Utsunomiya S, Reich M, Kesler SE, Ewing RC. «Invisible» Gold Revealed: Direct Imaging of Gold Nanoparticles in a Carlin-Type Deposit. *American Mineralogist*. 2004;89:1359–1366.

21. Yang Sixue, Blum S, Rahders E, Zhang Zhenru. The Nature of Invisible Gold in Sulfides from Xiangxi Au-Sb-W Ore Deposit in Northwestern Hunan, People's Republic of China. *The Canadian Mineralogist*. 1998;36:1361–1372.

22. Simon G, Kesler SE, Chryssoulis SL. Geochemistry and Textures of Gold-Bearing Arsenian Pyrite, Twin Creeks, Nevada; Implications for Deposition of Gold in Carlin-Type Deposits. *Economic Geology*. 1999;94(3):405–421.

<http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.94.3.405>

23. Fleet ME, Mumin AH. Gold-Bearing Arsenian Pyrite and Marcasite and Arsenopyrite from Carlin Trend Gold Deposits and Laboratory Synthesis. *American Mineralogist*. 1997;82(1-2):182–193. <https://doi.org/10.2138/am-1997-1-220>

24. Rogozhnikov DA, Shoppert AA, Dizer OA, Karimov KA, Rusalev RE. Leaching Kinetics of Sulfides from Refractory Gold Concentrates by Nitric Acid. *Metals*. 2019;9:465. Available from: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/4/465> zavedeniya [Accessed 17th November 2019]. <https://doi.org/10.3390/met9040465>

25. Dizer OA, Rogozhnikov DA, Naboychenko SS. Hydrochemical Investigation of Dissolving Sulfide Gold-Bearing Raw Material of Uderey Deposit. *Materials Science Forum*. 2019;946:535–540. Available from: <https://www.scientific.net/MSF.946.535> [Accessed 17th November 2019]. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.535>

26. Filippov AP, Nesterov YuV. *Redox Processes and Intensification of Metal Leaching*. Moscow: Ore and Metals; 2009, 543 p.

27. Samikhov ShR, Zinchenko ZA, Kholov KhI. Nitric acid technology for loosening refractory gold-, copper-, arsenic concentrates of Taror deposit. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering studies*. 2016;4:26–32. (In Russ.)

Критерии авторства

Рогожников Д.А., Дизер О.А., Потапов П.С., Мамяченков С.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.

Authorship criteria

Rogozhnikov D.A., Dizer O.A., Potapov P.S., Mamyachenkov S.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.



Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рогожников Денис Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
✉ e-mail: darogozhnikov@yandex.ru

Дизер Олег Анатольевич,
младший научный сотрудник,
кафедра металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
e-mail: oleg.dizer@yandex.ru

Потапов Павел Сергеевич,
магистрант,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
e-mail: potapov.pavel96@yandex.ru

Мамяченков Сергей Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;
e-mail: svmamychenkov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis A. Rogozhnikov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia;
✉ e-mail: darogozhnikov@yandex.ru

Oleg A. Dizer,
Junior Researcher of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia;
e-mail: oleg.dizer@yandex.ru

Pavel S. Potapov,
Master Degree Student,
Ural Federal University named after the First President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia;
e-mail: potapov.pavel96@yandex.ru

Sergey V. Mamyachenkov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the First President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia;
e-mail: svmamychenkov@yandex.ru

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставляется одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: 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.

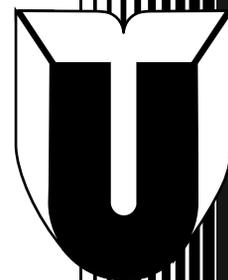
Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета



Научный журнал
№ 2 (151) 2020

12+

Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.04.2020 г. Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 30.
Тираж 500 экз. Заказ 103. Поз. плана 3н.

Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный исследовательский технический университет
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

