

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Tom **26**, № **2**. 2022 / Vol. **26**, № **2**. 2022

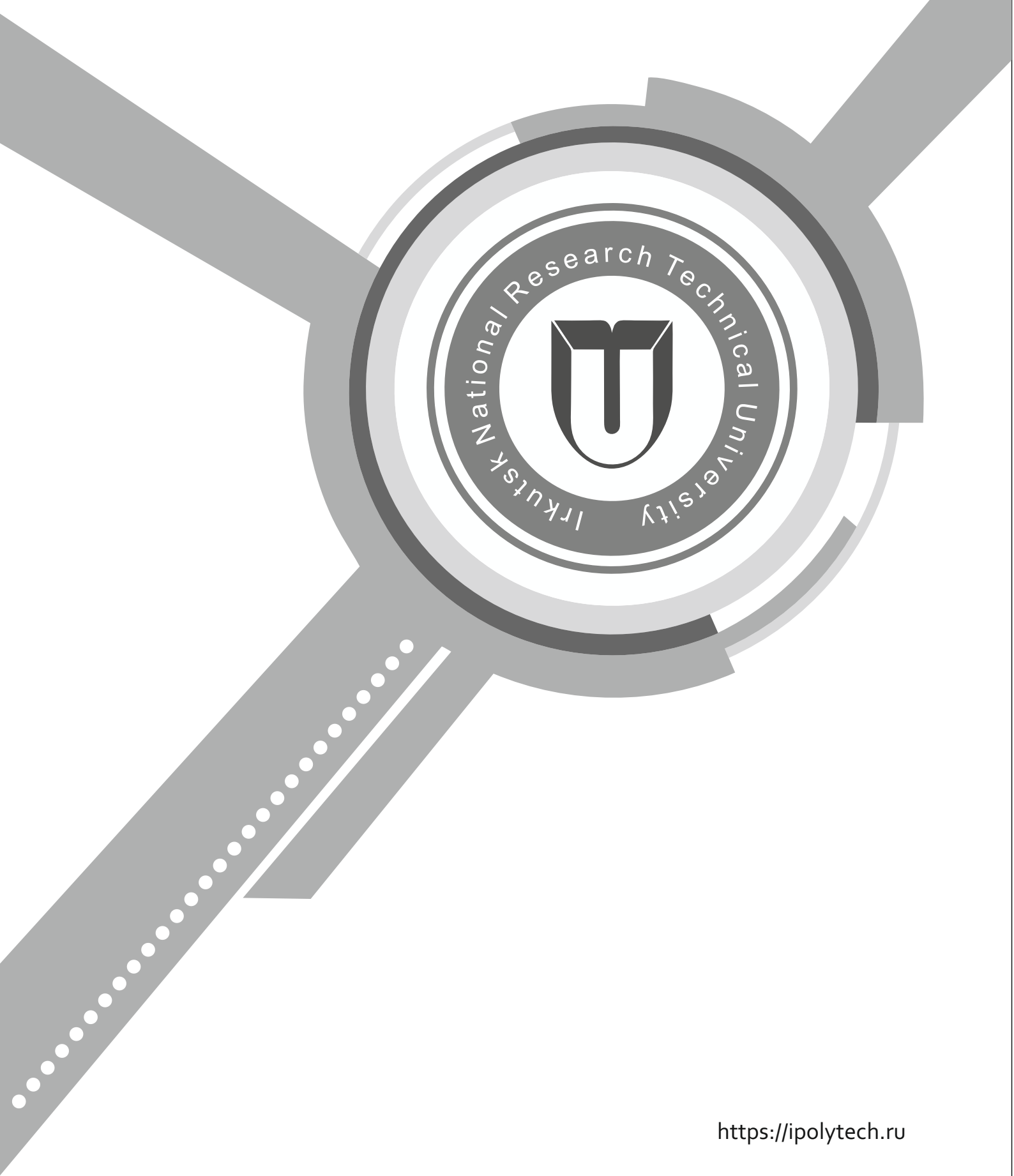


<https://ipolytech.ru>

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Tom 26, № 2. 2022 / Vol. 26, № 2. 2022



<https://ipolytech.ru>

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Том 26, № 2. 2022 / Vol. 26, № 2. 2022



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издательство
Иркутского национального исследовательского
технического университета

Периодичность издания – 4 раза в год.

Учредитель:
Иркутский национальный исследовательский
технический университет

Подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» - 41476
Адрес ООО «Урал-Пресс»:
620026, Свердловская область, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 130

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

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

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Tom 26, № 2. 2022 / Vol. 26, № 2. 2022

SCIENTIFIC JOURNAL

Publishers
of Irkutsk National Research
Technical University

Frequency of publication – 4 times a year.

Founder:
Irkutsk National Research
Technical University

The subscription code in Ural-Press LLC: 41476
The postal address of Ural-Press LLC:
130 Mamin-Sibiryak st.,
Yekaterinburg, 620026, Russia

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

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



Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ИЛЮШИН П.В., д.т.н., главный научный сотрудник ФГБУН "Институт энергетических исследований Российской академии наук", Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики

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

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

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

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

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

ЛИХИ Пол, профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Цент морских, климатических и энергетических исследований Ирландского научного фонда MAREI (г. Корк, Ирландия)

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

МАРЧУКИ И.В., д.ф.-м. н., профессор РАН, декан Механико-математического факультета Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск, Россия)

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

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

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

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

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

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

РАШИДИ Мохаммад Мехди, доктор, профессор Университета Тунцзи (Шанхай, Китай)

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

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

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

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

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

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

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

Editorial board

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

**Содержание**

160

Машиностроение

Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х. Исследование влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические характеристики.....	164
Рыжиков И. Н., Репецкий О. В., Нгуен Ван Винь. Численный анализ динамики и долговечности элементов ротора газотурбинного двигателя.....	173
Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Тищенко Р. Г. Технологическое обеспечение цифрового производства при обработке деталей шарико-стержневым упрочнителем.....	184

Энергетика

Аксаева Е. С., Глазунова А. М. Разработка метода определения гибкости электроэнергетической системы с ветропарками на базе искусственных нейронных сетей.....	197
Алхадж Хассан Ф., Алали Ш., Гайнуллина Л. Р. Повышение эффективности ветровых электростанций.....	217
Булатов Ю. Н. Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации с помощью групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты.....	228
Дзюбина Т. В., Ковалев Г. Ф., Крупенёв Д. С. Методы учета надежности поставки первичных энергоресурсов на электростанции при анализе надежности электроэнергетических систем.....	245
Дмитриев А. В., Мадышев И. Н., Галимова А. Т., Сахибгареев Н.Ф., Бадретдинова Г. Р., Николаев А. Н. Определение коэффициентов теплоотдачи в мультивихревом теплообменном устройстве.....	260
Жуйков А. В., Логинов Д. А., Монгуш Г. Р., Чичерин С. В., Землянский Н. А. Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Тыва до и после их карбонизации.....	270
Павлов В. Е. Исследование режимов работы технологического комплекса электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль.....	284
Реуцкий И. С., Курбацкий В. Г. Обоснование необходимости совершенствования систем противоаварийного управления для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению в энергосистемах.....	297
Рудых А. В., Сукьясов С. В. Управление мощностью электронагревательных элементов тиристорными преобразователями напряжения и сопротивления.....	310

Металлургия

Васильева А. А., Бодуэн А. Я., Васильев Р. Е. Анализ возможности применения гидрометаллургических методов с целью улучшения переработки медных концентратов.....	320
Королев А. А., Шунин В. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С. Фазовые равновесия в системе Hg-Al при вакуумной дистилляции.....	336
Сафиев Х., Наимов Н. А., Рузиев Дж. Р., Ахмадшоев И. Ш., Джуракулов А. М., Муродиён А., Немчинова Н. В. Физико-химические аспекты технологии получения криолита, используемого для производства алюминия, гидрохимическим способом с использованием поваренной соли.....	348

Content

161

Mechanical engineering

Zedgenizov V. G., Fayzov S. H. Influence of the main parameters of a dual-mass oscillation system on its dynamic characteristics.....	164
Ryzhikov I. N., Repetsky O. V., Nguyen Van Vinh. Numerical analysis of dynamics and durability of rotor elements in gas turbine engines.....	173
Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Tishchenko R. G. Technological support of digital production when processing parts using a ball-rod hardener.....	184

Energy industry

Aksaeva E. S., Glazunova A. M. Development of an artificial neural network-based method for determining the flexibility of power systems with high share of wind generation.....	197
Alhajj Hassan F., Alali Ch., Gainullina L. R. Increasing the efficiency of wind farms.....	217
Bulatov Yu. N. Flicker elimination in grids with distributed generation using group predictive voltage and frequency regulators.....	228
Dzyubina T. V., Kovalev G. F., Krupenev D. S. Reliability methods for delivery of primary energy resources at a power plant during a reliability audit of electric energy systems.....	245
Dmitriev A. V., Madyshev I. N., Galimova A. T., Sakhibgareev N. F., Badretdinova G. R. Determination of heat-transfer coefficients in multi-vortex heat-mass-exchange apparatus.....	260
Zhuikov A. V., Loginov D. A., Mongush G. R., Chicherin S. V., Zemlyansky N. A. Thermogravimetric analysis of Tyva Republic hard coals combustion before and after their carbonization.....	270
Pavlov V. E. Study of operational modes of an “electric drive–turbomachinery–pipeline” technological complex.....	284
Reutsky I. S., Kurbatsky V. G. Justification of the need to improve emergency control systems for preventing disturbances of voltage stability in power systems.....	297
Rudykh A. V., Sukyasov S. V. Power control of electric heating elements using thyristor voltage and resistance converters.....	310

Metallurgy

Vasilieva A. A., Boduen A. Ya., Vasiliev R. E. The feasibility of hydrometallurgical methods for enhancing the processing of copper concentrates.....	320
Korolev A. A., Shunin V. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I., Voinkov R. S. Phase equilibria in Hg-Al system during vacuum distillation.....	336
Safiev Kh., Naimov N. A., Ruziev J. R., Akhmadshoev I. Sh., Juraqulov A. M., Murodiyov A., Nemchinova N. V. Physico-chemical aspects of the technology for obtaining the cryolite used for the production of aluminum by a hydrochemical method using common salt.....	348



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal».

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

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение
- Энергетика
- Металлургия

Редколлегия

Dear Readers!

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

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

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

The journal "iPolytech Journal" is abstracted and reviewed.

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

- Mechanical Engineering
- Energy industry
- Metallurgy

Editorial Board



Исследование влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические характеристики

Виктор Георгиевич Зедгенизов^{1✉}, Сорбон Хотамович Файзов²

^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

¹vzedgenizov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5141-0876>

²sorbon.2018@mail.ru

Резюме. Цель – определение влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические характеристики, позволяющие расширить резонансную зону с целью снижения неустойчивости рабочего режима при изменении нагрузки или частоты вынуждающей силы. Объектом исследований явилась колебательная система вибромашины, состоящая из двух масс, связанных между собой упругим и диссипативным элементами. В исследованиях использованы основные положения теоретической механики, математического моделирования и имитационного эксперимента. По результатам исследований на математической модели двухмассовой колебательной системы в среде Matlab-Simulink предложен алгоритм, включающий в себя процедуру формирования амплитудно-частотной характеристики с расширенной резонансной зоной, и определено влияние основных параметров колебательной системы на расположение и ширину указанной резонансной зоны. Показано, что с увеличением второй массы колебательной системы горизонтальный участок амплитудно-частотной характеристики опускается вниз и сдвигается в область более низких частот. Это объясняется тем, что система становится более инертной по отношению к вынуждающей силе. Установлено, что при увеличении первой массы коэффициент усиления амплитудно-частотной характеристики повышается, а ширина горизонтального участка уменьшается. Выявлено, что с увеличением жесткости первого упругого элемента резонансный участок опускается еще ниже и сдвигается в сторону более высоких значений частоты вынуждающей силы; при этом ширина участка возрастает. Таким образом, способ корректировки амплитудно-частотной характеристики за счет введения дополнительной массы в конструкцию вибромашины с целью расширения ее резонансной зоны без применения специальных автоматических устройств является перспективным. Результаты проведенных исследований могут быть положены в основу методики расчета энергоэффективных резонансных вибромашин.

Ключевые слова: двухмассовая колебательная система, основные параметры, динамические характеристики, ширина резонансной зоны, Matlab-Simulink

Для цитирования: Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х. Исследование влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические характеристики // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 164–172. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-164-172>.

Influence of the main parameters of a dual-mass oscillation system on its dynamic characteristics

Viktor G. Zedgenizov^{1✉}, Sorbon H. Fayzov²

^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹vzedgenizov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5141-0876>

²sorbon.2018@mail.ru

Abstract. The influence of the main parameters of a dual-mass oscillation system on its dynamic characteristics is examined. The object of the study comprises the oscillation system of a vibration machine, containing two masses, connected by elastic and dissipative elements. A reduction in the instability of the operating mode when changing the load or frequency of the driving force can be achieved by expanding the resonance zone. Mathematical modelling and simulation experiment approaches were used for the research. Based on the results obtained using the mathematical model for

dual-mass oscillation system by Matlab-Simulink, an algorithm is proposed that includes a procedure for forming an amplitude-frequency response with an extended resonance zone and describing the influence of the main parameters of the oscillation system on the location and width of the specified resonance zone. It is shown that with an increase in the second mass of the oscillation system, the horizontal section of the amplitude-frequency response declines and shifts to the region of lower frequencies. This is explained by the increasing inertness of the system to the driving force. With a larger initial mass, the gain of amplitude-frequency response was shown to increase, while the width of the horizontal section decreases. Further, with increased stiffness of the first elastic element, the resonance section descends even lower and shifts towards higher frequency values of the driving force; however, the width of the section increases. Therefore, the method of correcting the amplitude-frequency response by introducing additional mass into the structure of an oscillation machine in order to expand its resonance zone with no additional automated devices seems promising. The obtained results may form the basis for a calculation method for energy-efficient resonance oscillation machines.

Keywords: two-mass oscillatory system, basic parameters, dynamic characteristics, width of the resonant zone, Matlab-Simulink

For citation: Zedgenizov V. G., Fayzov S. H. Influence of the main parameters of a dual-mass oscillation system on its dynamic characteristics. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):164-172. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-164-172>.

ВВЕДЕНИЕ

Вибрационные машины обладают уникальными свойствами и находят применение в различных отраслях промышленности, строительстве и сельском хозяйстве. Так, эффект вибрационного псевдооживления используется в машиностроении для обработки деталей (шлифования и полирования, упрочнения поверхности и ее очистки) путем создания виброкипящего слоя зернистого материала. Виброкипящий слой применяется и во многих других технологических процессах: сепарации, теплообмене, измельчении, сегрегации, смешивании, нанесении полимерных покрытий, сушке и др. Вибрационные эффекты также имеют место в процессах транспортирования, грохочения, бункерования, дозирования, уплотнения и разрыхления, просеивания, резания и т.д. [1].

Одним из путей повышения энергоэффективности вибрационных машин является использование резонансного режима. В резонансных машинах упругие и инерционные силы взаимно уравниваются, а мощность привода расходуется только на преодоление диссипативных сил. Принципиально резонансная настройка позволяет на порядок снизить потребляемую мощность при одновременном улучшении конструктивных, динамических и эксплуатационных качеств машины [2, 3].

Однако резонансные системы имеют свои недостатки из-за остроты резонансного пика, главным из которых является неустойчивость рабочего режима при изменении нагрузки или частоты вынуждающей силы. Эта неустойчи-

вость часто является причиной нарушения технологического процесса, что препятствует широкому внедрению высокоэффективных резонансных вибромашин [4–7].

Существующие способы стабилизации резонансных режимов, например, явление авторезонанса [8], возбуждение комбинационных параметрических колебаний или управление по каналу обратной связи [9], требуют дополнительных устройств и систем управления. Поэтому перспективным следует признать способ корректировки амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) за счет введения дополнительной массы в конструкцию вибромашин с целью расширения ее резонансной зоны без применения специальных автоматических устройств [1, 10].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические характеристики, позволяющие расширить резонансную зону.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена расчетная схема двухмассовой колебательной системы.

Колебательная система состоит из двух масс, связанных между собой упругим и диссипативным элементами. Кроме того, первая масса также через упругий и диссипативный элементы соединена с неподвижным основанием, и к ней приложена синусоидальная вынуждающая сила. Коэффициенты демпфирования учитывают потери энергии при движении системы.

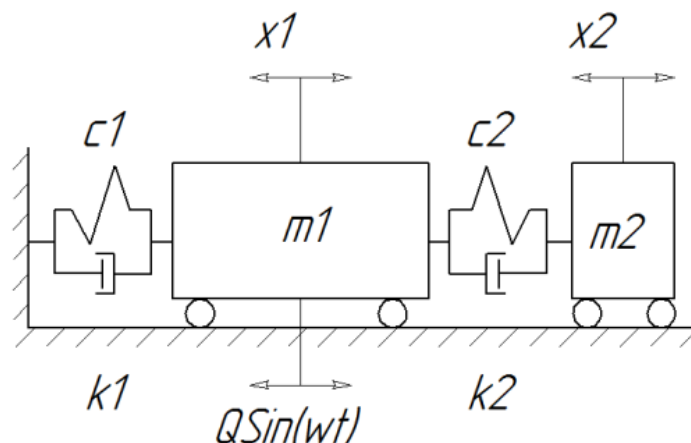


Рис. 1. Расчетная схема двухмассовой колебательной системы
Fig. 1. Design diagram of a two-mass oscillatory system

Первая масса имитирует рабочий орган вибрационной машины, вторая – служит для коррекции АЧХ.

Движение системы может быть описано следующей системой дифференциальных уравнений:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 \frac{dx_1}{dt} + k_2 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) = Q \sin(\omega t); \quad (1)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + c_2 (x_1 - x_2) = 0, \quad (2)$$

где m_1 и m_2 – первая и вторая массы колебательной системы; x_1 и x_2 – перемещения первой и второй массы, соответственно; k_1 и k_2 – коэффициенты демпфирования масс; c_1 и c_2 – коэффициенты жесткости упругих элементов; $Q \sin(\omega t)$ – вынуждающая сила.

Уравнение (1) определяет перемещение первой, а уравнение (2) – перемещение второй массы.

Для получения АЧХ колебательной системы в среде Matlab-Simulink разработана схема, которая представлена на рис. 2³ [11, 12].

Входной сигнал формирует блок Input Point1, отклик системы в виде амплитуды перемещений первой и второй масс снимается с блоков Output Point и Output Point1 и регистрируется в блоке Scope.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные данные для имитационного эксперимента: $m_1 = 200$ кг; $m_2 = 50$ кг; $c_1 = 1265$ кН/м; $k_1 = 80$ Нс/м. Указанные параметры выбраны в привязке к создаваемому типоразмерному ряду стенов, которые укладываются в расчетную схему, приведенную на рис. 1. Жесткость c_2 ориентировочно определяется из условия, при котором достигается «плато» на АЧХ колебательной системы [1]:

$$c_2 \approx c_1 \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}. \quad (3)$$

В результате имитационного моделирования получены АЧХ двухмассовой колебательной системы (рис. 3). Верхний график соответствует амплитуде колебаний первой массы, нижний – второй массы.

Кривая 1 получена по исходным данным и представляет собой классическую АЧХ двухмассовой колебательной системы с двумя ярко выраженными резонансными пиками: первый определяется собственной частотой колебаний первой массы, второй – соответствует собственной частоте колебаний второй массы.

³Бенькович Е. С., Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Практическое моделирование динамических систем: учеб. пособ. СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург», 2002. 464 с.

С увеличением частоты вынуждающей силы амплитуда колебаний первой массы начинает возрастать. Так как первая и вторая массы связаны между собой упругим элементом, то увеличивается амплитуда колебаний и второй массы. По мере приближения частоты вынуждающей силы к первой из собственных частот колебаний системы наблюдается резкое увеличение амплитуд колебаний обеих масс – первый резонанс [13–17].

Дальнейшее повышение частоты вынуждающей силы приводит к снижению амплитуд колебаний обеих масс, так как наблюдается отстройка системы от первой резонансной частоты [18–23].

По мере увеличения частоты вынуждающей силы и приближения ее ко второй из собственных частот колебаний системы наблюдается второе увеличение амплитуды колебаний первой массы – второй резонанс системы. При этом амплитуда колебаний второй массы также повышается, а затем АЧХ обеих масс асимптотически приближа-

ются к нулю.

Повышение коэффициента демпфирования второй массы приводит к уменьшению второго резонансного пика и сглаживанию АЧХ (кривая 2). При этом обе массы колебательной системы движутся отдельно.

Дальнейшее повышение демпфирования второй массы трансформирует двухмассовую колебательную систему в одномассовую, и обе массы движутся совместно (кривая 3).

На рис. 3 указаны две характерные точки «а» и «б», через которые проходят все кривые независимо от степени демпфирования системы. При соблюдении условия (3) указанные точки будут находиться на одном уровне, и, следовательно, существует такой коэффициент демпфирования второй массы, при котором указанные точки соединяются горизонтальной прямой (кривая 4). В этом случае на АЧХ двухмассовой системы появляется горизонтальный участок, на котором амплитуда первой массы не зависит от частоты вынуждающей силы.

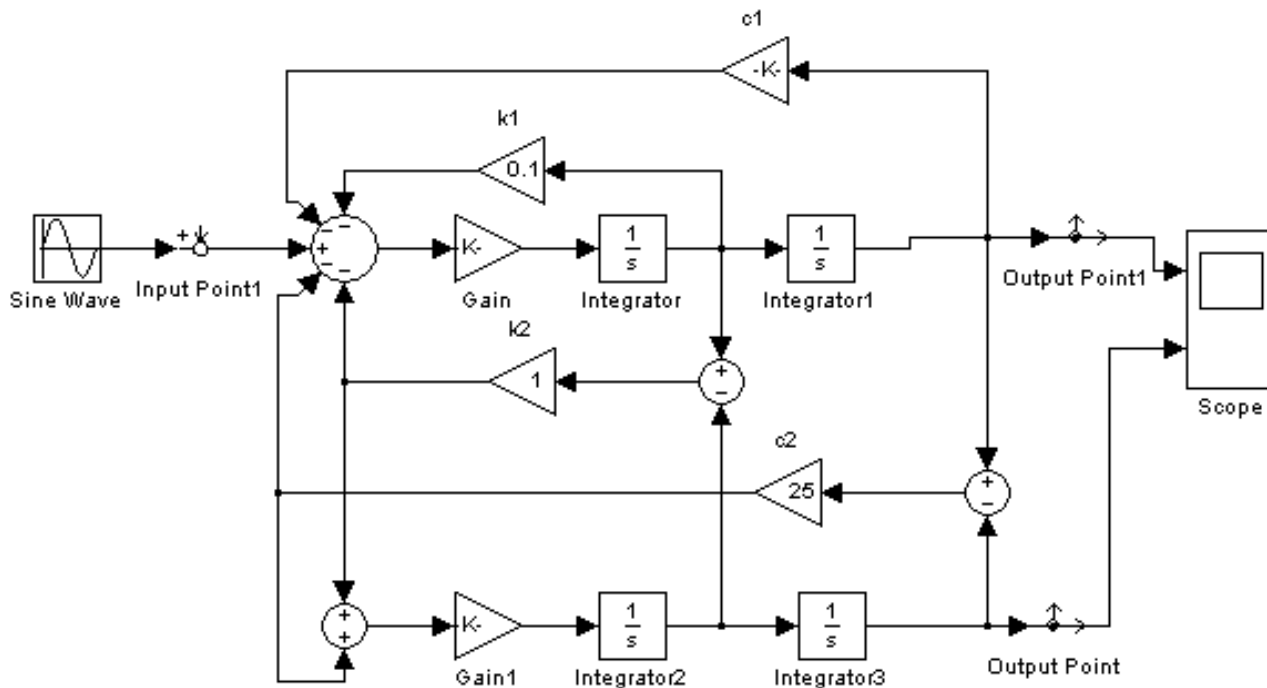


Рис. 2. Схема решения в Matlab-Simulink
Fig. 2. Solution diagram in Matlab-Simulink

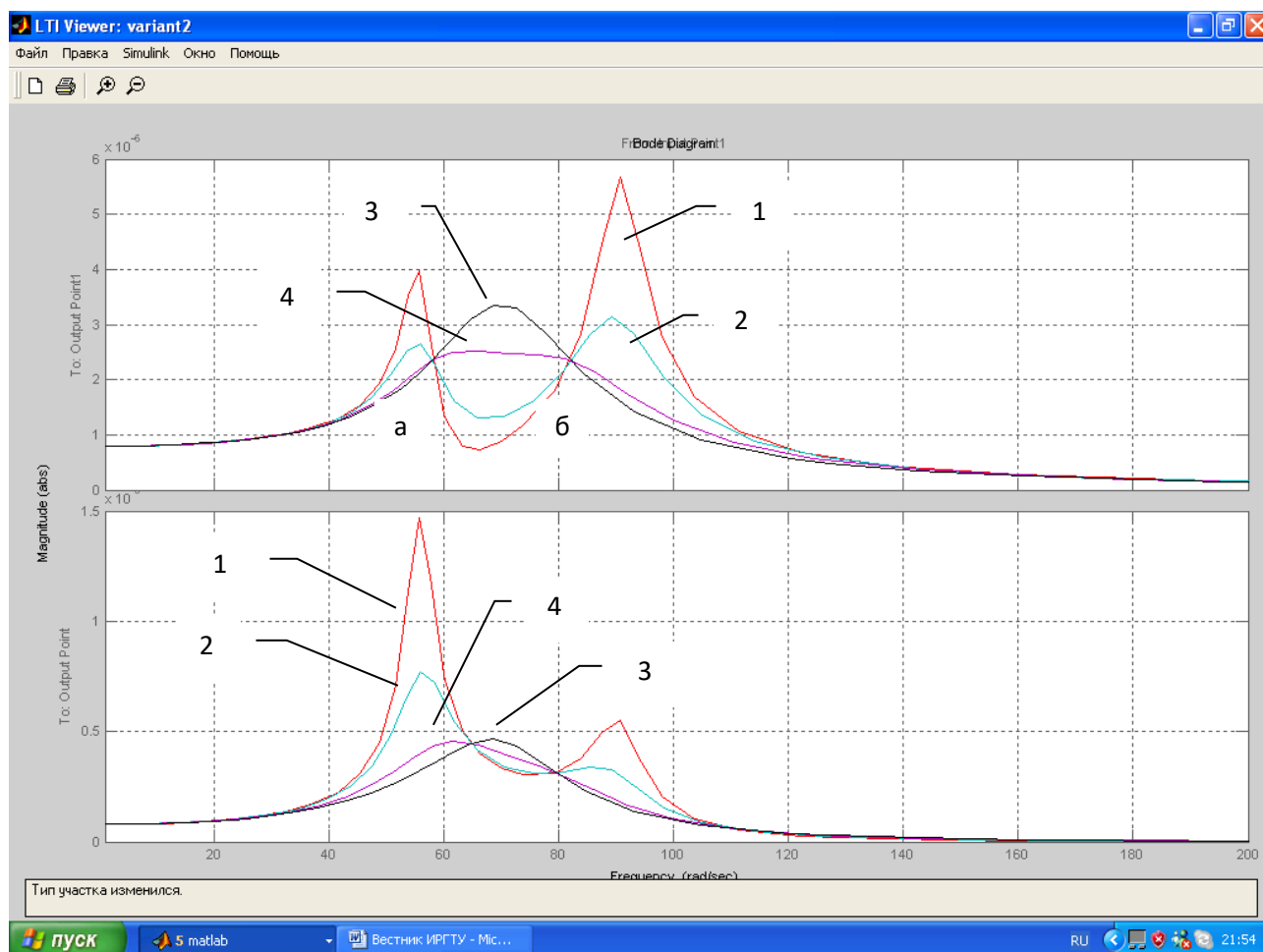


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика двухмассовой колебательной системы при различных значениях коэффициента демпфирования k_2 : 1 – $k_2 = 500$ Нс/м; 2 – $k_2 = 1000$ Нс/м; 3 – $k_2 = 3000$ Нс/м; 4 – $k_2 = 2150$ Нс/м
Fig. 3. Amplitude-frequency response of a two-mass oscillatory system at different values of the damping coefficient k_2 : 1 – $k_2 = 500$ Ns/m; 2 – $k_2 = 1000$ Ns/m; 3 – $k_2 = 3000$ Ns/m; 4 – $k_2 = 2150$ Ns/m

Расположение указанного участка на АЧХ зависит от параметров колебательной системы. На рис. 4 представлена АЧХ двухмассовой системы с различным соотношением масс и коэффициента жесткости упругого элемента c_1 .

Параметры m_1 , m_2 , c_1 и k_1 являются независимыми и выбираются в привязке к создаваемому типоразмерному ряду стендов, которые укладываются в расчетную схему, приведенную на рис. 1. Жесткость упругого элемента c_2 определяется по формуле (3), а величина коэффициента демпфирования k_2 – из условия появления на АЧХ горизонтального участка.

Анализ зависимостей показывает, что с увеличением второй массы (кривая 2) АЧХ опускается вниз, и горизонтальный участок сдвигается в область более низких частот. Это объясняется тем, что система становится более инертной по отношению к вынуждающей силе. При увеличении первой массы (кривая 3) коэффициент усиления АЧХ повышается, а ширина горизонтального участка уменьшается. С увеличением жесткости первого упругого элемента горизонтальный участок АЧХ опускается еще ниже и сдвигается в сторону более высоких значений частоты вынуждающей силы. При этом ширина участка возрастает (кривая 4).

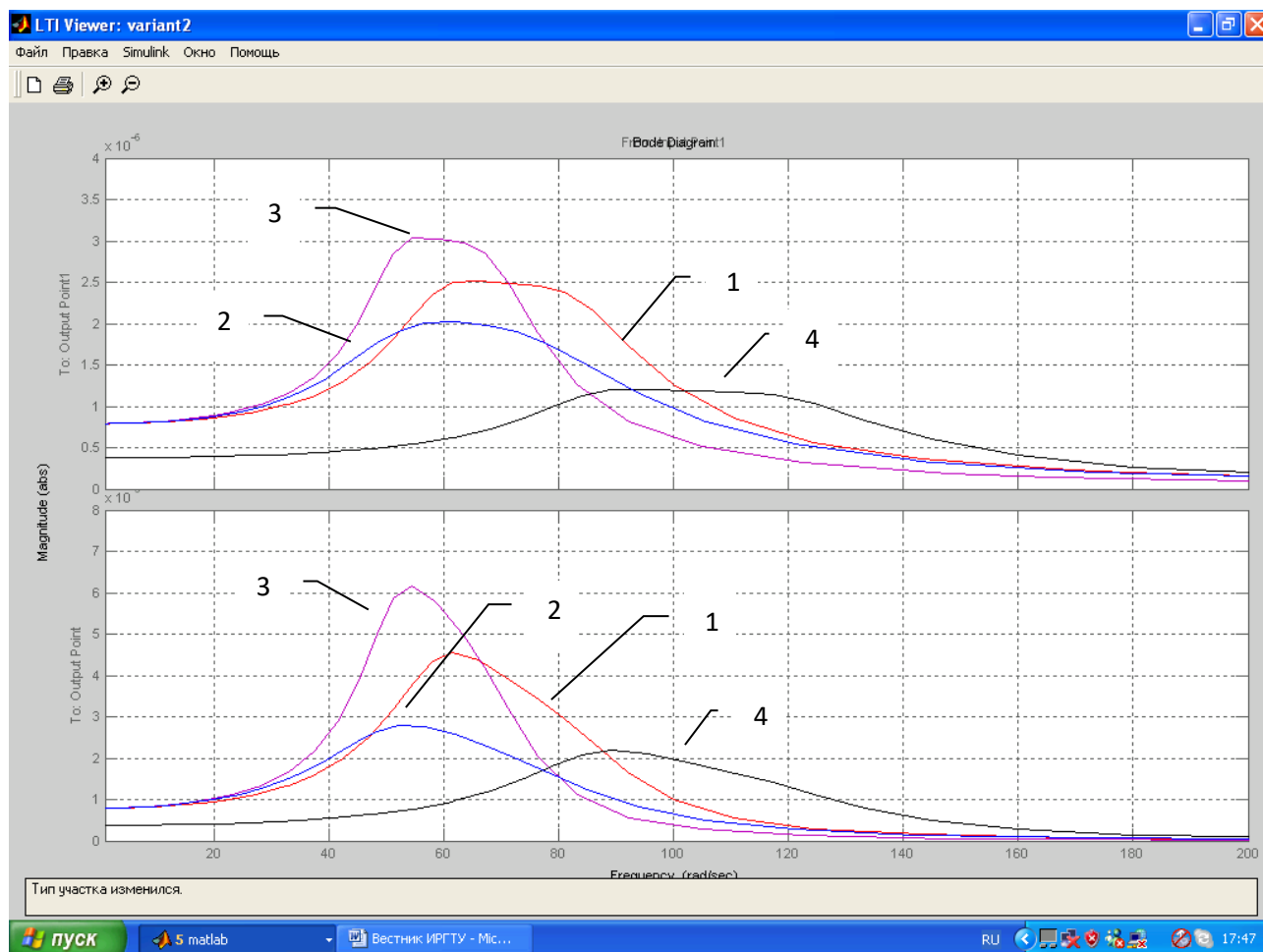


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика двухмассовой колебательной системы при различном соотношении масс и коэффициента жесткости упругого элемента c_1 :

- 1 – $m_1 = 200$ кг; $m_2 = 50$ кг; $c_1 = 1265$ кН/м; $c_2 = 202$ кН/м; $k_1 = 80$ Нс/м; $k_2 = 2150$ Нс/м
- 2 – $m_1 = 200$ кг; $m_2 = 100$ кг; $c_1 = 1265$ кН/м; $c_2 = 281$ кН/м; $k_1 = 80$ Нс/м; $k_2 = 5150$ Нс/м
- 3 – $m_1 = 300$ кг; $m_2 = 50$ кг; $c_1 = 1265$ кН/м; $c_2 = 155$ кН/м; $k_1 = 80$ Нс/м; $k_2 = 1600$ Нс/м
- 4 – $m_1 = 200$ кг; $m_2 = 50$ кг; $c_1 = 2650$ кН/м; $c_2 = 424$ кН/м; $k_1 = 80$ Нс/м; $k_2 = 3100$ Нс/м

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristic of a two-mass oscillatory system under different ratio of masses and stiffness coefficient of the elastic element c_1 :

- 1 – $m_1 = 200$ kg; $m_2 = 50$ kg; $c_1 = 1265$ kN/m; $c_2 = 202$ kN/m; $k_1 = 80$ Ns/m; $k_2 = 2150$ Ns/m
- 2 – $m_1 = 200$ kg; $m_2 = 100$ kg; $c_1 = 1265$ kN/m; $c_2 = 281$ kN/m; $k_1 = 80$ Ns/m; $k_2 = 5150$ Ns/m
- 3 – $m_1 = 300$ kg; $m_2 = 50$ kg; $c_1 = 1265$ kN/m; $c_2 = 155$ kN/m; $k_1 = 80$ Ns/m; $k_2 = 1600$ Ns/m
- 4 – $m_1 = 200$ kg; $m_2 = 50$ kg; $c_1 = 2650$ kN/m; $c_2 = 424$ kN/m; $k_1 = 80$ Ns/m; $k_2 = 3100$ Ns/m

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен алгоритм, включающий в себя процедуру формирования АЧХ с расширенной резонансной зоной.

2. Определено влияние основных параметров колебательной системы на располо-

жение и ширину указанной резонансной зоны АЧХ.

3. Результаты проведенных исследований могут быть положены в основу методики расчета энергоэффективных резонансных вибротамашин.

Список источников

1. Федоренко И. Я., Гнездилов А. А. Динамические свойства двухмассовой вибрационной технологической машины // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 3. С. 179–183.
2. Быховский И. И., Попов С. И. Автоматизация резо-

нансных вибротамашин. М.: Изд-во «ЦНИИТЭстроймаш», 1972. 162 с.

3. Дмитриев В. Н., Горбунов А. А. Резонансный вибрационный электропривод машин и установок с автоматическим управлением // Известия Самарского научно-

го центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 3. С. 310–314.

4. Лян И. П., Пановко Г. Я., Шохин А. Е. К вопросу об энергопотреблении вибрационных технологических машин // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения: сб. тр. конф. (г. Москва, 4–6 декабря 2019 г.). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2020. С. 334–337.

5. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5. No. 1. P. 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111216>.

6. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. Experimental research of rectilinear translational vibrations of a screen box excited by a ball balancer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3. No. 1. P. 23–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101798>.

7. Zhakash A., Talasbaev A. A., Raymova A. Self-synchronization of two one-mass resonant vibrators // Theoretical & Applied Science. 2015. Vol. 26. Iss. 6. С. 48–51. <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2015.06.26.11>.

8. Асташев В. К. О новых направлениях использования явления резонанса в машинах // Вестник научно-технического развития. 2011. № 8. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.vntr.ru/nomera/2011-848/\(14.12.2021\)](http://www.vntr.ru/nomera/2011-848/(14.12.2021)).

9. Пановко Г. Я., Шохин А. Е. К вопросу о резонансной настройке транспортно-технологических вибростанов // Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем: сб. тр. XVIII Междунар. симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. А. Е. Кобринского (г. Москва – Бекасово, 17–23 мая 2015 г.). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2015. С. 213–217.

10. Черноусько Ф. Л., Акуленко Л. Д., Соколов Б. Н. Управление колебаниями: монография. М.: Изд-во «Наука», 1980. 383 с.

11. Кривцов С. Н. Обоснование необходимости совершенствования стратегии технического сервиса аккумуляторных топливopодающих систем автомобильных дизельных двигателей // Автотранспортное предприятие. 2016. № 8. С. 44–47.

12. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: Изд-во «ДМК Пресс», 2008. 290 с.

13. Кривцов С. Н., Зедгенизов В. Г. Методологические

основы рационального применения методов диагностики автомобилей с дизельным двигателем и аккумуляторной топливopодающей системой в технологических процессах технического обслуживания и ремонта // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4. С. 176–187. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-176-187>.

14. Yaroshevich N. P., Zabrodets I. P., Yaroshevich T. S. Dynamics of starting of vibrating machines with unbalanced vibroexciters on solid body with flat vibrations // Applied Mechanics and Materials. 2016. Vol. 849. P. 36–45. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.849.36>.

15. Кривцов С. Н. Динамический метод диагностирования автомобильных дизелей, оснащенных аккумуляторной топливopодающей системой // Автомобильная промышленность. 2015. № 9. С. 26–29.

16. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. М.: Изд-во «Высшая школа», 1980. 408 с.

17. Шрейнер П. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: монография. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2000. 654 с.

18. Скубов Д. Ю., Ходжаев К. Ш. Нелинейная электромеханика: монография. М.: Изд-во «Физматлит», 2003. 360 с.

19. Garanin A. Yu., Silaeva E. V., Shlegel' O. A., Popenko V. N. DC electromagnet traction force calculation // Электротехника. 2003. № 2. С. 55–58.

20. Yatsun V. V., Filimonikhin G. B., Dumenko K., Nevdakha A. Y. Experimental research of rectilinear translational vibrations of a screen box excited by a ball balancer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3. Iss. 1. P. 23–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101798>.

21. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Non-synchronous motions near critical speeds in a single-plane autobalancing device // Technische Mechanik. 2004. Vol. 24. P. 25–36.

22. Lu Chung-Jen, Tien Meng-Hsuan. Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. Vol. 32. P. 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.06.00116>.

23. Artyunin A. I., Elisseyev S. V. Effect of “crawling” and peculiarities of motion of a rotor with pendular self-balancers // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 373-375. P. 38–42. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.373-375.38>.

References

1. Fedorenko I. Ya., Gnezdilov A. A. The dynamic properties of a two-mass vibration technological machine. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016;3:179-183. (In Russ.).
2. Byhovskij I. I., Popov S. I. *Automation of resonant vibration machines*. Moscow: CNIITEstrojmash; 1972, 162 p. (In Russ.).
3. Dmitriev V. N., Gorbunov A. A. Resonant vibration electric drive of machines and plants with automatic control.

Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2009;11(3):310-314. (In Russ.).
4. Lyan I. P., Panovko G. Ya., Shohin A. E. On the issue of energy consumption of vibration technological machines. In: *XXXI Mezhdunarodnaya innovacionnaya konferenciya molodyh uchenyh i studentov po problemam mashinovedeniya: sbornik trudov konferencii = Interna-*

tional Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering". 4–6 December 2019, Moscow. Moscow: Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences; 2020, p. 334-337. (In Russ.).

5. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;5(1):19-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111216>.

6. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. Experimental research of rectilinear translational vibrations of a screen box excited by a ball balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;3(1):23-29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101798>.

7. Zhakash A., Talasbaev A. A., Raymova A. Self-synchronization of two one-mass resonant vibrators. *Theoretical & Applied Science*. 2015;26(6):48-51. <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2015.06.26.11>.

8. Astashev V. K. On new application trends of the resonance phenomenon in machines. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*. 2011;8. Available from: <http://www.vntr.ru/nomera/2011-848/> [Accessed 14th December 2021]. (In Russ.).

9. Panovko G. Ya., Shohin A. E. To resonant tuning of transport-technological vibration machines. In: *Dinamika vibroudarnykh (sil'no nelineynykh) sistem: sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnogo simpoziuma, posvyashchennogo 100-letiyu so dnya rozhdeniya doktora tekhnicheskikh nauk, professora A. E. Kobrinskogo = Dynamics of vibro-impact (strongly nonlinear) systems: Collected works of 18th International Symposium dedicated to the 100th birth anniversary of Doctor of technical sciences, Professor A.E. Kobrinsky*. 17–23 May 2015, Moscow – Bekasovo. M.: Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences; 2015, p. 213-217. (In Russ.).

10. Chernous'ko F. L., Akulenko L. D., Sokolov B. N. *Oscillation Control*. Moscow: Nauka; 1980, 383 p. (In Russ.).

11. Krivtsov S. N. Substantiation of the need to improve the technical service strategy for the vehicle with diesel engine equipped with common rail fuel injection system. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2016;10:24-27. (In Russ.).

12. Chernykh I. V. Modeling of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink. Moscow: DMK Press, 2008. 290 p.

13. Krivtsov S. N., Zedgenizov V. G. Methodological bases for rational use of diagnostic methods of diesel vehicles equipped with common rail fuel injection systems in technological processes of maintenance and repair. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(4):176-187. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-176-187>.

14. Yaroshevich N. P., Zabrodets I. P., Yaroshevich T. S. Dynamics of starting of vibrating machines with unbalanced vibroexciters on solid body with flat vibrations. *Applied Mechanics and Materials*. 2016;849:36-45. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.849.36>.

15. Krivtsov S. N. Dynamical method for diagnosing of automobile diesel engines equipped with common rail fuel injection system. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2015;9:26-29. (In Russ.).

16. Biderman V. L. *Theory of mechanical oscillations*. Moscow: Vysshaya shkola; 1980, 408 p. (In Russ.).

17. Shrejner R. T. *Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2000, 654 p. (In Russ.).

18. Skubov D. Yu., Hodzhaev K. Sh. *Nonlinear electromechanics*. Moscow: Fizmatlit; 2003, 360 p. (In Russ.).

19. Garanin A. Yu., Silaeva E. V., Shlegel' O. A., Popenko V. N. DC electromagnet traction force calculation. *Elektrotehnika*. 2003;2:55-58.

20. Yatsun V. V., Filimonikhin G. B., Dumenko K., Nevdakha A. Y. Experimental research of rectilinear translational vibrations of a screen box excited by a ball balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017;3(1):23-29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101798>.

21. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Non-synchronous motions near critical speeds in a single-plane autobalancing device. *Technische Mechanik*. 2004;24:25-36.

22. Lu Chung-Jen, Tien Meng-Hsuan. Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012;32:251-268. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.06.00116>.

23. Artyunin A. I., Elisayev S. V. Effect of "crawling" and peculiarities of motion of a rotor with pendular self-balancers. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;373-375:38-42.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.373-375.38>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зедгенизов Виктор Георгиевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры строительных, дорожных машин
и гидравлических систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor G. Zedgenizov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Road Construction
Machines and
Hydraulic Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Файзов Сорбон Хотамович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Sorbon H. Fayzov,
Postgraduate Student
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.11.2021; одобрена после рецензирования 28.01.2022; принята к публикации 20.06.2022.

Information about the article

The article was submitted 15.11.2021; approved after reviewing 28.01.2022; accepted for publication 20.06.2022.



Научная статья

УДК 534.1:539.3

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-173-183>

Численный анализ динамики и долговечности элементов ротора газотурбинного двигателя

Игорь Николаевич Рыжиков^{1✉}, Олег Владимирович Репецкий², Ван Винь Нгуен³¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^{2,3} Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского,

Иркутская область, Иркутский р-н, п. Молодежный, Россия

¹rin111@list.ru²repetskiy@igsha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>³vinh.july177@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0030-1503>

Резюме. Цель – разработать высокоточный алгоритм расчета долговечности рабочих колес роторов газотурбинных двигателей с расстройкой параметров. При компьютерном моделировании свободных и вынужденных колебаний рабочих колес использовался метод конечных элементов, лежащий в основе программного комплекса Ansys. При экспериментальных исследованиях расстройка имитировалась прикреплением дополнительных масс к лопаткам колеса. Расчеты частот, форм вынужденных колебаний, а также динамических напряжений, возникающих при вынужденных колебаниях, проводились с использованием рядов Фурье. При расчете долговечности использовался метод схематизации динамических напряжений, т.е. разделения полученных напряжений по уровням с соответствующими амплитудами. Основным результатом исследований является разработанный алгоритм расчета долговечности рабочих колес роторов газотурбинных двигателей с расстройкой параметров. Данный алгоритм был положен в основу компьютерной программы Ocs_Rotor, предназначенной для исследования собственных колебаний лопаток и рабочих колес с расстройкой параметров. С помощью данной программы были рассчитаны собственные частоты и формы колебаний лопаток с расстройкой параметров. На основе полученных результатов были рассчитаны динамические напряжения при вынужденных колебаниях, а также долговечность рабочего колеса. Анализ полученных результатов расчетов долговечности реального рабочего колеса с тремя вариантами расположения лопаток с расстройкой позволил выбрать вариант конструкции с максимальной долговечностью, составившей $1,75 \cdot 10^5$ ч. Сравнение результатов расчетов, полученных с помощью программы Ocs_Rotor, с результатами натурного эксперимента, проведенного в Бранденбургском техническом университете (г. Котбус, Германия), демонстрирует хорошую точность с максимальной погрешностью 4%. Это позволяет сделать вывод о возможности применения данной программы при проектировании конструкций с максимальной долговечностью. Анализ полученных результатов расчетов долговечности реального рабочего колеса с разными вариантами расположения лопаток с расстройкой в колесе позволил выработать практические рекомендации для проектировщиков по порядку расположения лопаток с расстройкой в колесе.

Ключевые слова: рабочее колесо, расстройка, колебания, долговечность

Для цитирования: Рыжиков И. Н., Репецкий О. В., Нгуен Ван Винь. Численный анализ динамики и долговечности элементов ротора газотурбинного двигателя // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 173–183. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-173-183>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Numerical analysis of dynamics and durability of rotor elements in gas turbine engines

Igor N. Ryzhikov^{1✉}, Oleg V. Repetskiy², Van Vinh Nguyen³¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^{2,3} Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny settlement,

© Рыжиков И. Н., Репецкий О. В., Нгуен Ван Винь, 2022

<https://ipolytech.ru>

Irkutsk region, Irkutsk district, Russia

¹rin111@list.ru

²repetckii@igsha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>

³vinh.july177@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0030-1503>

Abstract. In this work, an accurate algorithm for calculating the durability of rotor wheels in gas turbine engines undergoing detuning of parameters was developed. The finite element method, underlying the Ansys Software, was used for modelling free and forced oscillations of rotor wheels. During the experiments, the detuning was simulated by attaching additional masses to the wheel blades. The calculations of frequencies, modes of forced oscillations, as well as dynamic stresses arising due to these oscillations, were carried out using the Fourier series. The schematisation of dynamic stresses, i.e. differentiation of obtained stresses into levels having specific amplitudes, was used to calculate durability. The main research result comprises the developed algorithm for calculating the durability of rotor wheels of gas-turbine engines subjected to parameter detuning. This algorithm served as a basis for the Ocs_Rotor software for investigating the natural oscillations of blades and rotor wheels under parameter detuning. Using this software, the natural frequencies and oscillation modes of the blades were calculated. Dynamic stresses under forced oscillations, as well as durability of the rotor wheel, were calculated using the obtained results. The results of calculating the service life of an actual rotor wheel having three different positions of blades under detuning allowed the construction having the maximum service life of $1.75 \cdot 10^5$ hours to be selected. Comparing the results of calculations, obtained using the Ocs_Rotor software, with those of field experiments, carried out at Brandenburg Technical University (Cottbus, Germany), demonstrated high accuracy characterised by a maximum error of 4%. This suggests that the software may be used to design structures of maximum service life. The results of durability calculations of an actual rotor wheel having different blade positions under detuning allowed practical recommendations for engineers on the positioning of the blades in the wheel to be established.

Keywords: impeller, detuning, vibrations, fatigue life

For citation: Ryzhikov I. N., Repetsky O. V., Nguyen Van Vinh. Numerical analysis of dynamics and durability of rotor elements in gas turbine engines. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):173-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-173-183>.

ВВЕДЕНИЕ

Для газотурбинных двигателей (ГТД) летательных аппаратов надежность рабочих колес определяет не только надежность всего двигателя, но и безопасность использования летательного аппарата [1–3].

При эксплуатации рабочие колеса турбомашин испытывают воздействие разнообразных нагрузок (центробежных, газовых, от неравномерного нагрева и т.д.). Помимо статических и температурных нагрузок, рабочие колеса испытывают значительные динамические нагрузки, возникающие вследствие колебаний, которые могут значительно снизить их долговечность.

Расстройка параметров колебаний, возникающая в результате геометрической и физической неидентичности секторов рабочего колеса, содержащих рабочие лопатки, способна значительно изменить спектр его колебаний, привести к значительному перераспределению динамических напряжений и

их концентрации вследствие возникающей локализации колебаний на отдельных лопатках. Чаще всего расстройка оказывает вредное влияние, приводя к значительному снижению долговечности отдельных лопаток и колеса в целом.

Исследованиям колебаний рабочих колес с расстройкой параметров посвящено достаточно большое количество опубликованных работ [1–20].

Одной из первых работ, в которых излагается проблема влияния расстройки параметров на характеристики колебаний рабочих колес газотурбинных двигателей (ГТД), является литературный источник⁴. Приведенный в нем коэффициент, называемый коэффициентом увеличения амплитуды колебаний, позволяет рассчитать величину расстройки параметров:

$$\gamma = \frac{u_{\max(\text{mistuned})}}{u_{\max(\text{tuned})}} = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{N}), \quad (1)$$

⁴Irretier H., Repetski O. Analyse der eigenschwingungen rotierender axialer und radialer laufräder und schaufelpakete von turbomaschinen mittels hyper-elemente, kondensation und der methode zyklischer symmetrie. Forschungsbericht DAAD, Mittellung 4/1991. Kassel Universität: GHK, Institut für Mechanik, 1991. 121 p.

где γ – коэффициент увеличения амплитуды; $u_{\max(mistuned)}$ – максимальная амплитуда свободных колебаний расстроенных рабочих колес; $u_{\max(tuned)}$ – максимальная амплитуда свободных колебаний рабочих колес без расстройки. Как можно наблюдать, величина коэффициента увеличения амплитуды зависит от числа секторов рабочего колеса или числа лопаток N .

Влияние расстройки параметров на характеристики колебаний рабочих колес ГТД и на их напряженное состояние также рассматривается в литературных источниках [4–20].

В работах [2–7] представлены результаты экспериментальных исследований влияния расстройки параметров на колебания осевых и радиальных колес роторов ГТД.

Работы [8–10] посвящены численному исследованию свободных колебаний рабочих колес ГТД с расстройкой, в том числе с помощью разработанного авторами пакета программ BLADIS+.

В статьях [11, 12] описаны методы построения компьютерных моделей рабочих колес с расстройкой, позволяющие существенно уменьшить требуемые для расчета вычислительные ресурсы (память, быстродействие).

Исследования влияния расстройки параметров на вынужденные колебания рабочих колес описаны в статьях [13, 15]. Влиянию расстройки параметров на долговечность рабочих колес посвящена статья [16].

В работах [17–20] описаны исследования колебаний рабочих колес с расстройкой, вызванной разными условиями закрепления лопаток в диске, влиянием аэродинамических сил, а также приводятся результаты исследований расстройки параметров вероятностными методами.

Авторами данной статьи разработаны математические модели, с помощью которых возможно проведение анализа влияния расстройки параметров [2, 4, 15] на частоты и формы колебаний рабочих колес ГТД, а также на их долговечность. В статье содержатся результаты данного анализа, проведенного с помощью разработанной компьютерной про-

граммы Ocs_Rotor и программного комплекса ANSYS [1].

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАНИЙ КОЛЕС БЕЗ РАССТРОЙКИ

Уравнение динамики системы, обладающей циклической симметрией, при собственных колебаниях (согласно методу конечных элементов) в матричной записи имеет вид:

$$\mathbf{M}\ddot{\delta} + \mathbf{K}\delta = 0; \quad (2)$$

при этом

$$\delta = \delta_A \cos(\omega t - \beta), \quad (3)$$

где $\mathbf{K}$ – матрица жесткости; $\mathbf{M}$ – матрица масс; δ – вектор перемещений; $\ddot{\delta}$ – вектор ускорений; δ_A – амплитуда; ω – круговая частота; β – фаза колебаний.

В результате преобразований данное уравнение имеет вид:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\delta_A = 0. \quad (4)$$

Тестовый расчет свободных колебаний рабочего колеса компрессора, содержащего 29 лопаток, был проведен в программе Ocs_Rotor.

Характеристики модели: материал – титановый сплав; модуль упругости – $1,2 \cdot 10^5$ МПа; плотность – $4,64 \text{ кг/см}^3$, коэффициент Пуассона – 0,26. На рис. 1 представлена геометрическая модель рабочего колеса и первые формы его колебаний.

На рис. 2 представлен алгоритм расчета свободных колебаний рабочих колес, положенный в основу одного из модулей программы Ocs_Rotor.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАНИЙ КОЛЕСА С РАССТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ

На рис. 3 показано исследуемое рабочее колесо, подготовленное для эксперимента [2]. Расстройка параметров искусственно вносилась в конструкцию добавлением к лопаткам дополнительных масс путем присоединения небольших шайб (рис. 3).

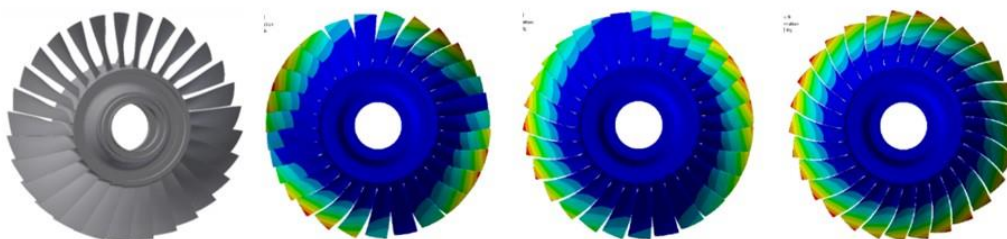


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель рабочего колеса и первые формы его свободных колебаний
Fig. 1. Three-dimensional geometric model of the impeller and the first forms of its free vibrations

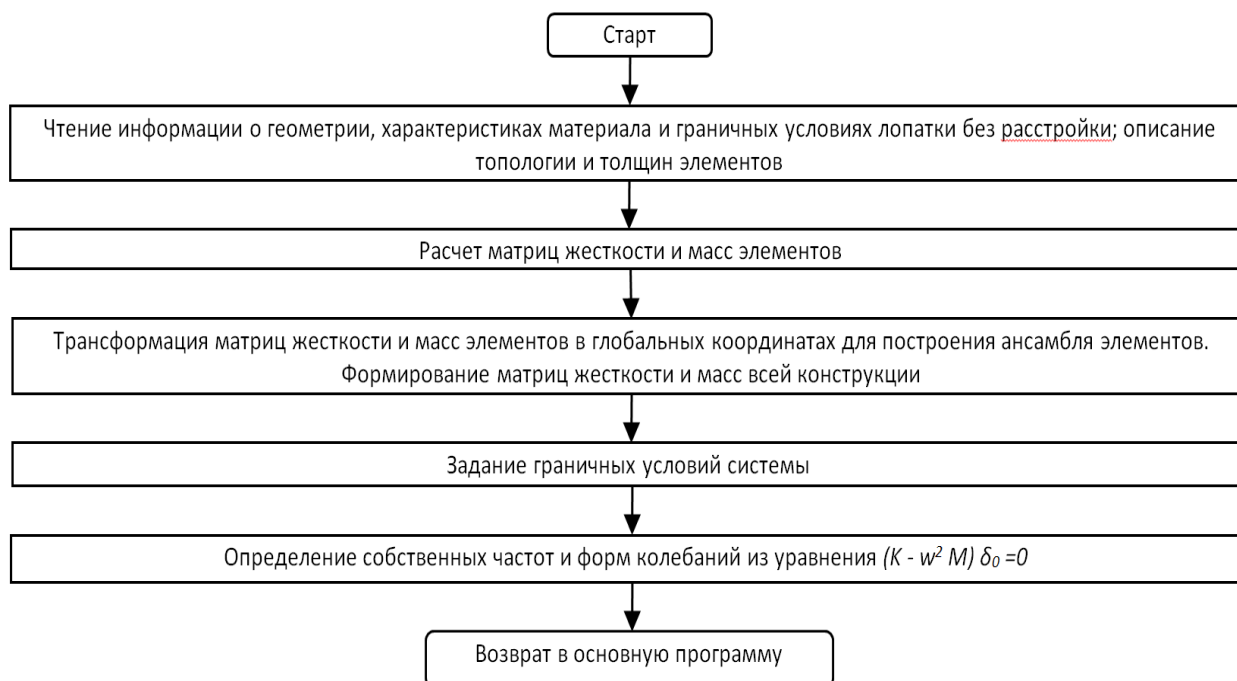


Рис. 2. Алгоритм расчета свободных колебаний рабочих колес
Fig. 2. Calculation algorithm of impeller free vibrations



Рис. 3. Добавленные массы на лопатках
Fig. 3. Added masses on the blades

В табл. 1 представлены значения дополнительных масс, присоединенных к лопаткам (индекс i соответствует номеру лопатки в колесе). Величина расстройки параметров рассчитывалась по формуле:

$$\Delta f_n = \frac{(f_n^2 - f_0^2)}{f_0^2}, \quad (5)$$

где f_n – частота свободных колебаний n -й лопатки; f_0 – частота свободных колебаний лопатки без расстройки.

На рис. 4 показан алгоритм расчета значений расстройки параметров при добавлении к ним дополнительной массы. Данный алгоритм положен в основу одного из модулей программы Ocs_Rotor.

Таблица 1. Значения добавленных масс Δm_i
Table 1. Values of added masses Δm_i

Δm_i , кг	Δm_i , кг	Δm_i , кг
0,001251438	0,001431641	0,001353855
0,001302135	0,001402101	0,001125457
0,000025385	0,000565487	0,000085468
0,001102155	0,001562635	0,001402131
0,001305213	0,001700681	0,001202142
0,001205113	0,001186481	0,001102152
0,000802912	0,000765541	0,001302563
0,001100517	0,001557549	0,000356523
0,001302102	0,001135588	0,001205537
0,001202101	0,001257446	

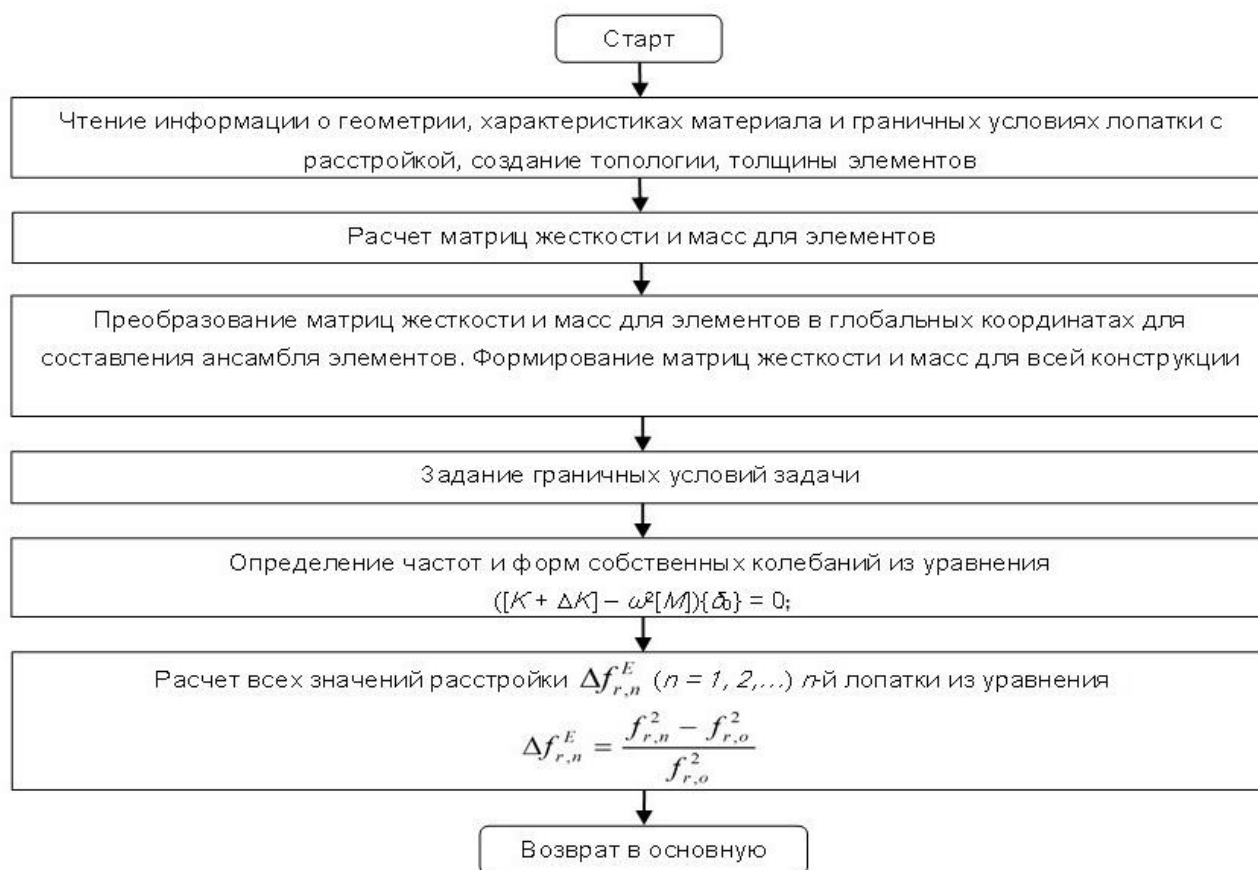


Рис. 4. Алгоритм расчета значений расстройки отдельных лопаток
Fig. 4. Calculation algorithm of individual blade detuning values

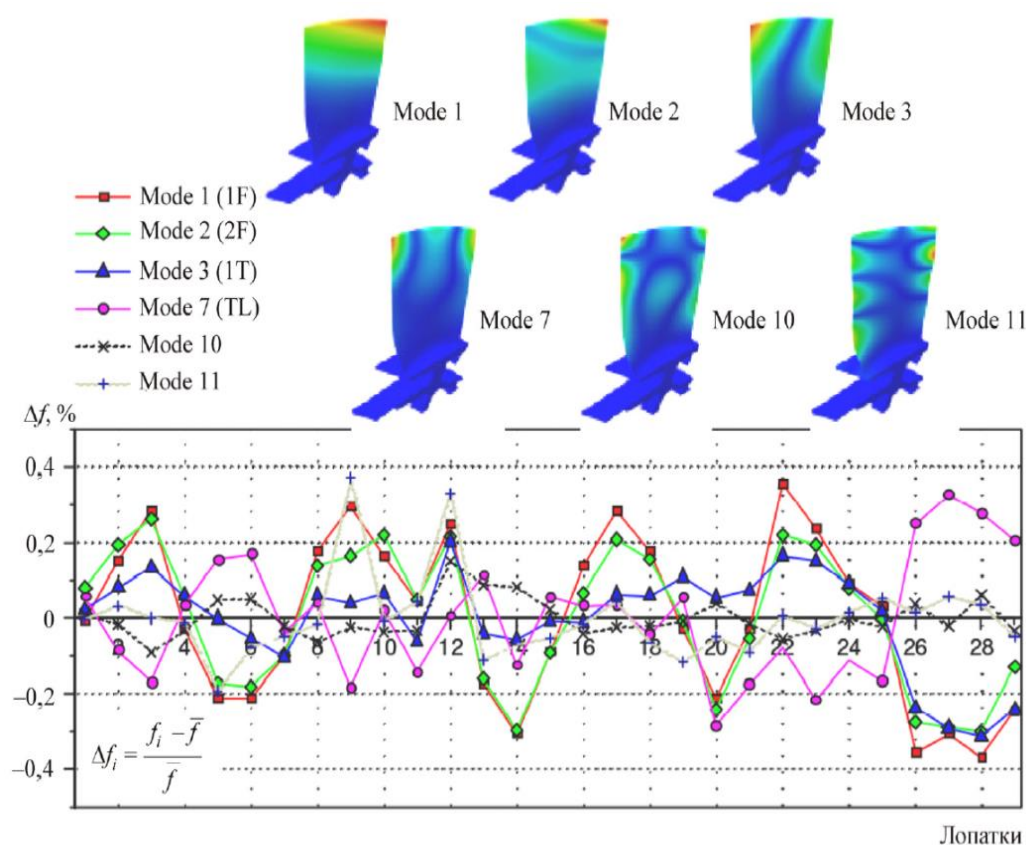


Рис. 5. Расстройка при разных формах колебаний
Fig. 5. Detuning at different vibration forms

Таблица 2. Значения частот первых форм свободных колебаний лопаток с расстройкой, Гц
Table 2. Frequency values of the first forms of free vibrations of detuned blades, Hz

№ лопатки	1-я изгибная форма		2-я изгибная форма		№ лопатки	1-я изгибная форма		2-я изгибная форма	
	эксп.	Ocs_Rotor	эксп.	Ocs_Rotor		эксп.	Ocs_Rotor	эксп.	Ocs_Rotor
1	403,59	416,17	1255,04	1304,41	16	404,41	418,40	1254,81	1313,31
2	404,19	416,17	1256,41	1305,42	17	405,02	418,42	1256,62	1313,32
3	405,08	416,28	1257,32	1305,41	18	404,51	419,23	1256,01	1314,31
4	403,78	416,28	1254,73	1307,23	19	403,73	419,20	1254,00	1314,31
5	403,02	416,27	1251,92	1307,22	20	403,02	419,42	1251,02	1315,33
6	403,01	416,27	1251,81	1308,53	21	403,71	419,41	1254,43	1315,32
7	403,27	416,47	1252,81	1308,51	22	405,33	419,82	1255,84	1315,83
8	404,40	416,46	1255,80	1309,52	23	404,82	419,82	1256,41	1315,80
9	405,08	416,58	1256,12	1309,51	24	404,23	420,33	1256,02	1316,42
10	404,57	416,67	1256,83	1310,33	25	404,03	420,31	1255,01	1316,43
11	404,08	416,67	1254,62	1310,32	26	402,43	420,20	1251,60	1316,80
12	404,67	417,16	1256,73	1311,23	27	402,62	420,21	1251,42	1316,83
13	403,18	417,26	1252,01	1311,24	28	402,34	420,32	1251,23	1317,22
14	402,68	417,79	1250,32	1312,22	29	402,81	420,32	1251,41	1317,22
15	403,59	417,78	1252,93	1312,11	—	—	—	—	—

Примечание: эксп. – полученные экспериментально.

Расстройка, рассчитанная по формуле (5) при различных формах колебаний лопаток, представлена на рис. 5.

Значения частот свободных колебаний лопаток с расстройкой (расчетные и полу-

ченные экспериментально) представлены в табл. 2.

Как можно видеть из табл. 2, результаты расчета и данные эксперимента хорошо согласуются между собой.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫНУЖДЕННОЙ ВИБРАЦИИ РАССТРОЕННОГО РАБОЧЕГО КОЛЕСА

При моделировании вынужденных колебаний лопаток колеса вводилось предположение, что возбуждение колебаний рабочих лопаток осуществляется посредством влияния от 20-ти сопловых лопаток. При расчете величины возбуждающей нагрузки использовался ряд Фурье:

$$F(t) = L(1 + 0,5\cos\varphi + 0,025\cos2\varphi), \quad (6)$$

где L – статическая часть нагрузки.

На рис. 6 и 7 представлены перемещения и напряжения в лопатках при вынужденных колебаниях. На графиках можно видеть резонансные пики в районах частот 1300 Гц и 1800 Гц.

АНАЛИЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

На следующем этапе исследований в программном комплексе ANSYS проводился

расчет долговечности колеса с разного вида расстройкой. Расстройка вводилась искусственно – путем присоединения к лопаткам колеса шайб различной массы. Исследовались три варианта расположения лопаток с расстройкой на ободе колеса:

1) к лопаткам добавлялись дополнительные массы в соответствии с табл. 1;

2) к 28-ми лопаткам добавлялись одинаковые массы (по 0,00211 кг), к 29-й лопатке масса не добавлялась;

3) к 28-ми лопаткам добавлялись одинаковые массы (по 0,005 кг), к 29-й лопатке масса не добавлялась.

На рис. 8 и в табл. 3 представлены результаты расчетов долговечности колеса с расстройкой параметров. Как видно из рис. 8 и табл. 3, максимальная долговечность достигается в первом случае, когда дополнительные массы наиболее равномерно распределены по окружности рабочего колеса и расстройка является минимальной.

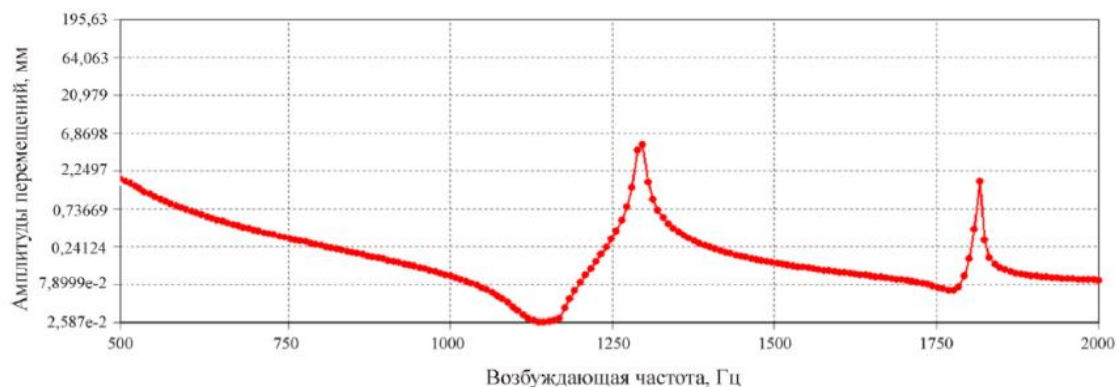


Рис. 6. Перемещения лопаток при действии возбуждающей нагрузки
 Fig. 6. Blade displacements under the excitation load

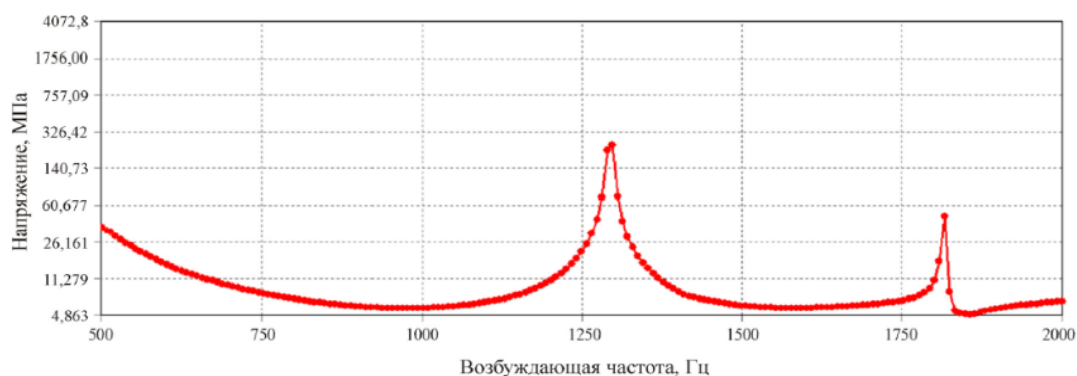
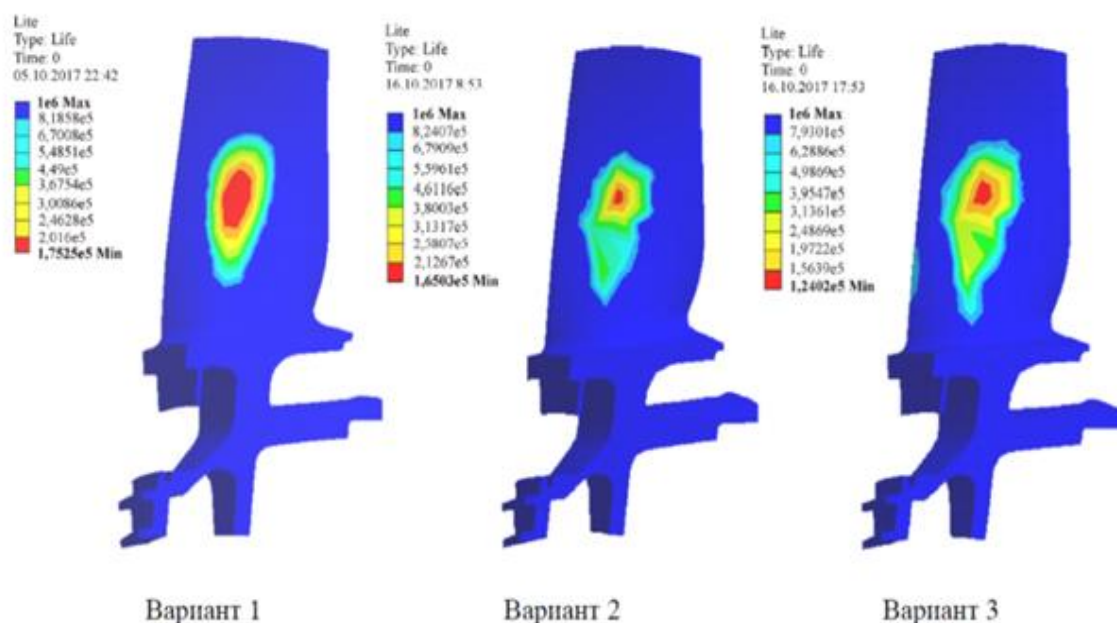
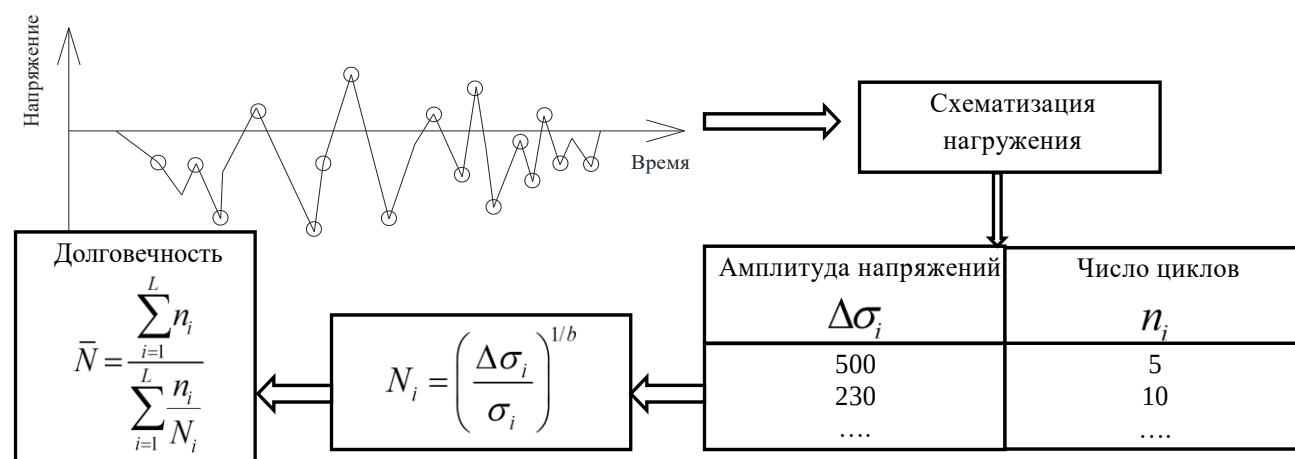


Рис. 7. Эквивалентные напряжения в лопатках при действии возбуждающей нагрузки
 Fig. 7. Equivalent stresses in the blades under the excitation load

Таблица 3. Результаты расчетов долговечности
Table 3. Calculation results of fatigue life

Форма колебаний	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
	частота колебаний, Гц					
	Ocs_Rotor	эксп.	Ocs_Rotor	эксп.	Ocs_Rotor	эксп.
1	416,3863	403,8575	403,3855	397,8126	410,3865	402,9376
2	1304,5585	1255,0781	1296,5418	1261,0001	1300,2215	1252,6876
3	1843,3259	1766,0641	1803,3785	1766,3126	1826,6855	1765,6751
Долговечность	1.7524E + 5 ч		1.6502E + 5 ч		1.2403E + 5 ч	

Примечание: эксп. – полученные экспериментально.

**Рис. 8.** Результаты расчета долговечности лопаток
Fig. 8. Calculation results of blade fatigue life**Рис. 9.** Алгоритм расчета долговечности
Fig. 9. Fatigue life calculation algorithm

На рис. 9 представлен алгоритм расчета долговечности рабочего колеса. Согласно алгоритму расчета долговечности, после определения динамических напряжений ме-

тодом конечных элементов осуществляется их схематизация, т.е. разделение полученных напряжений по уровням с соответствующими амплитудами, определение числа цик-

лов для каждого уровня, расчет долговечностей каждого уровня и, в итоге, расчет общей долговечности конструкции. Здесь N_i – число циклов нагружения для i -го уровня напряжений; σ_i – максимальное напряжение i -го уровня; L – количество уровней напряжений. Для расчета b используется зависимость $b = (0,8 \dots 0,9)k$, где k – коэффициент, учитывающий влияние всех факторов на сопротивление усталости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что увеличение дополнительной массы приводит к увеличению расстройки и, как следствие, к снижению долговечности (2), (3). Из рассмотренных вариантов наибольшая долговечность была получена в случае, когда все лопатки имели дополнительные

массы (расстройку) сравнительно небольшой величины. При этом разница между массами у соседних лопаток была минимальной, вариант (1). Минимальная долговечность наблюдается для варианта, когда в окружном направлении расстройка лопаток постепенно возрастает и максимальный скачок в значениях расстройки наблюдается между первой и последней лопатками в колесе.

Анализ результатов исследований долговечности рабочего колеса позволил выработать практическую рекомендацию для проектировщиков подобных конструкций, заключающуюся в том, что для достижения максимальной долговечности необходимо исключить случаи, когда соседние лопатки в колесе имеют большую разницу в расстройке (т.е. случаи «пилообразного» распределения лопаток с расстройкой по окружности колеса).

Список источников

1. Irretier H., Repetskiy O. Analyse der eigenschwingungen rotierender axialer und radialer lauffraeder und schaufelpakete von turbomaschinen mittels hyperelemente, kondensation und der methode zyklischer symmetrie. Kassel: Kassel Universität, 1991. 121 p.
2. Рыжиков И. Н. Экспериментальные исследования расстройки параметров моделей рабочих колес газотурбинных двигателей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12. С. 53–57.
3. Рыжиков И. Н. К оценке долговечности роторов газотурбинных двигателей // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей VI Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 13–16 апреля 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 288–294.
4. Репецкий О. В., Рыжиков И. Н., Шмидт Р. Исследования влияния различных видов расстройки параметров на колебания и долговечность рабочих колес турбомашин // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD (Байкальский государственный университет экономики и права). 2010. № 1. С. 20–31.
5. Repetskiy O., Ryjikov I. Modeling and simulation of dynamic processes with help of program package BLADIS+ // Innovations and Advanced Techniques in Systems, Computing Sciences and Software Engineering. 2008. P. 219–220.
6. Figaschewsky F., Kühhorn A. Analysis of mistuned blade vibrations based on normally distributed blade individual natural frequencies // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air: Conference Proceedings. 2015. <https://doi.org/10.1115/GT2015-43121>.
7. Wagner J. T. Coupling of turbomachine blade vibrations through the rotor // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1967. Vol. 89. Iss. 4. P. 502–512. <https://doi.org/10.1115/1.3616718>.
8. Ewins D. J., Han Z. S. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk // Journal of Vibration and Acoustics. 1984. Vol. 106. Iss. 2. P. 211–217. <https://doi.org/10.1115/1.3269171>.
9. Repetskiy O., Ryjikov I., Springer H. Numerical analysis of rotating flexible blade-disk-shaft systems // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air: Conference Proceedings. 1999. <https://doi.org/10.1115/99-GT-317>.
10. Репецкий О. В., До Мань Тунг. Анализ влияния расстройки параметров на колебания рабочих колес турбомашин на основе пружинно-массовой модели // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10. С. 56–63.
11. Bladh J. R., Castanier M. P., Pierre C. Component-mode-based reduced order modeling techniques for mistuned bladed disks – part I: theoretical models // Journal of Engineering for Gas turbines and Power. 2001. Vol. 123. Iss. 1. P. 89–99. <https://doi.org/10.1115/1.1338947>.
12. Wagner M. B., Younan A., Allaire P., Cogill R. Model reduction methods for rotor dynamic analysis: a survey and review // International Journal of Rotating Machinery. 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/273716>.
13. Beirrow B. Grundlegende untersuchungen zum schwingungsverhalten von verdichterlaufrädern in integralbauweise. Cottbus: Shaker Verlag, 2009. 174 p.
14. Sinha A. Calculating the statistics of forced response of a mistuned bladed disk assembly // AIAA Journal. 1986. Vol. 24. No. 11. P. 1797–1801. <https://doi.org/10.2514/3.9526>.
15. Happaawana G. S., Nwokah O. D. I., Bajaj A. K., Azene M. Free and forced response of mistuned linear cyclic systems: a singular perturbation approach // Journal of Sound and Vibration. 1998. Vol. 211. Iss. 5. P. 761–789.

<https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1349>.

16. Repetckii O., Nguyen Tien Quyet, Ryzhikov I. Investigation of vibration and fatigue life of mistuned bladed disks // *Actual Issues of Mechanical Engineering: Proceedings of the International Conference (Tomsk, 27–29 July 2017)*. Tomsk, 2017. Vol. 133. P. 702–707. <https://doi.org/10.2991/aime-17.2017.114>.
17. Griffin J. H., Hoosac T. M. Model development and statistical investigation of turbine blade mistuning // *Journal of Vibration and Acoustics*. 1984. Vol. 106. Iss. 2. P. 204–210. <https://doi.org/10.1115/1.3269170>.
18. Griffin J. H., Sinha A. The interaction between mistuning and friction in the forced response of bladed disk assemblies // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1985. Vol. 107. Iss. 1. P. 205–211. <https://doi.org/10.1115/1.3239684>.
19. Pierre C., Murthy D. V. Aeroelastic modal characteristics of Mistuned blade assemblies: Mode localization and loss of eigenstructure // *AIAA Journal*. 1992. Vol. 30. No. 10. P. 2036–2050. <https://doi.org/10.2514/3.11251>.
20. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Modal analyses of an axial turbine blisk with intentional mistuning // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2018. Vol. 140. Iss. 1. P. 012503. <https://doi.org/10.1115/1.4037588>.

References

1. Irretier H., Repetskiy O. *Analyse der eigenschwingungen rotierender axialer und radialer laufträder und schaufelpakete von turbomaschinen mittels hyper-elemente, kondensation und der methode zyklischer symmetrie*. Kassel: Kassel Universität; 1991, 121 p.
2. Ryzhikov I. N. Experimental studies of parameter mistuning of GTE bladed disk models. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;12:53-57. (In Russ.).
3. Ryzhikov I. N. On the assessment of gas turbine engine rotor durability. In: *Aircraft Engineering and Transport of Siberia: sbornik statej VI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Aircraft Engineering and Transport of Siberia. Collected articles of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conference*. 13–16 April 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, p. 288-294. (In Russ.).
4. Repeckij O. V., Ryzhikov I. N., Shmidt R. Studies of the effect of various types of parameter detuning on vibrations and durability of turbomachine impellers. *Vestnik Bajkal'skogo soyuza stipendiatov DAAD (Bajkal'skij gosudarstvennyj universitet ekonomiki i prava) = Baikal Research Journal*. 2010;1:20-31. (In Russ.).
5. Repetskiy O., Ryjikov I. Modeling and simulation of dynamic processes with help of program package BLADIS+. *Innovations and Advanced Techniques in Systems, Computing Sciences and Software Engineering*. 2008;219-220.
6. Figaschewsky F., Kühhorn A. Analysis of mistuned blade vibrations based on normally distributed blade individual natural frequencies. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air: Conference Proceedings*. 2015. <https://doi.org/10.1115/GT2015-43121>.
7. Wagner J. T. Coupling of turbomachine blade vibrations through the rotor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1967;89(4):502-512. <https://doi.org/10.1115/1.3616718>.
8. Ewins D. J., Han Z. S. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk. *Journal of Vibration and Acoustics*. 1984;106(2):211-217. <https://doi.org/10.1115/1.3269171>.
9. Repetskiy O., Ryjikov I., Springer H. Numerical analysis of rotating flexible blade-disk-shaft systems. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air: Conference Proceedings*. 1999. <https://doi.org/10.1115/99-GT-317>.
10. Repetskiy O. V., Do Manh Tung. Analyzing parameter detuning effect on turbomachine rotor wheel vibrations based on spring-mass model. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;10:56-63. (In Russ.).
11. Bladh J. R., Castanier M. P., Pierre C. Component-mode-based reduced order modeling techniques for mistuned bladed disks – part I: theoretical models. *Journal of Engineering for Gas turbines and Power*. 2001;123(1):89-99. <https://doi.org/10.1115/1.1338947>.
12. Wagner M. B., Younan A., Allaire P., Cogill R. Model reduction methods for rotor dynamic analysis: a survey and review. *International Journal of Rotating Machinery*. 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/273716>.
13. Beirow B. *Grundlegende untersuchungen zum schwingungsverhalten von verdichterlaufrädern in integralbauweise*. Cottbus: Shaker Verlag; 2009, 174 p.
14. Sinha A. Calculating the statistics of forced response of a mistuned bladed disk assembly. *AIAA Journal*. 1986;24(11):1797-1801. <https://doi.org/10.2514/3.9526>.
15. Happawana G. S., Nwokah O. D. I., Bajaj A. K., Azene M. Free and forced response of mistuned linear cyclic systems: a singular perturbation approach // *Journal of Sound and Vibration*. 1998;211(5):761-789. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1349>.
16. Repetckii O., Nguyen Tien Quyet, Ryzhikov I. Investigation of vibration and fatigue life of mistuned bladed disks. In: *Actual Issues of Mechanical Engineering: Proceedings of the International Conference*. 27–29 July 2017, Tomsk. Tomsk; 2017, vol. 133, p. 702-707. <https://doi.org/10.2991/aime-17.2017.114>.
17. Griffin J. H., Hoosac T. M. Model development and statistical investigation of turbine blade mistuning. *Journal of Vibration and Acoustics*. 1984;106(2):204-210. <https://doi.org/10.1115/1.3269170>.
18. Griffin J. H., Sinha A. The interaction between mistuning and friction in the forced response of bladed disk assemblies. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1985;107(1):205-211. <https://doi.org/10.1115/1.3239684>.
19. Pierre C., Murthy D. V. Aeroelastic modal characteristics of mistuned blade assemblies: mode localization and

loss of eigenstructure. *AIAA Journal*. 1992;30(10):2036-2050. <https://doi.org/10.2514/3.11251>.

20. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Modal analyses of an axial turbine blisk with

intentional mistuning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2018;140(1):012503. <https://doi.org/10.1115/1.4037588>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыжиков Игорь Николаевич,

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

Репецкий Олег Владимирович,

доктор технических наук, профессор,
проректор по международным связям,
Иркутский государственный аграрный
университет им. А. А. Ежевского,
664038, Иркутская область, Иркутский р-н,
п. Молодежный, 1/1, Россия

Нгуен Ван Винь,

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

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.01.2021; одобрена после рецензирования 07.03.2022; принята к публикации 05.05.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor N. Ryzhikov,

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

Oleg V. Repetskiy,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Vice-Rector for International Relations,
Irkutsk State Agrarian University named
after A.A. Ezhevsky,
1/1, Molodezhny settlement, Irkutsk region,
Irkutsk district, 664038, Russia

Van Vinh Nguyen,

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

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 27.01.2021; approved after reviewing 07.03.2022; accepted for publication 05.05.2022.



Научная статья
УДК 621.7:004.942

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-184-196>

Технологическое обеспечение цифрового производства при обработке деталей шарико-стержневым упрочнителем

Михаил Аркадьевич Тамаркин^{1✉}, Элина Эдуардовна Тищенко²,
Роман Геннадьевич Тищенко³

¹⁻³Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

¹tehn_rostov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>

²lina_tishenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>

³tishenkoroma@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-5495-8749>

Резюме. Цель – разработка модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов обработки многоконтактным виброударным инструментом – шарико-стержневым упрочнителем. Объектом исследования явился технологический процесс обработки шарико-стержневым упрочнителем. В качестве критериев оценки эффективности использовались производительность и себестоимость процесса обработки, выраженная в длительности и стоимости достижения заданных параметров упрочнения. В качестве ограничительных функций использовались геометрические и физико-механические параметры поверхностного слоя обрабатываемых деталей, заданные конструктором. Остаточные напряжения в исследуемых образцах определялись по методу Давиденкова. При автоматизации проектирования технологических процессов использовалась среда разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на языке программирования C#. В результате проведенных исследований установлено, что на формирование качества поверхностного слоя деталей оказывают влияние основные технологические параметры (энергия удара индентора, количество стержней и радиус их заточки, натяг при обработке). На основе проведенных теоретических исследований процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем получены адекватные теоретические модели формирования различных параметров качества поверхностного слоя обработанных деталей и времени обработки. Полученная зависимость прошла комплексную экспериментальную проверку в условиях ПАО «Роствертол» (г. Ростов-на-Дону). Измерения остаточных напряжений в поверхностном слое обработанных ШСУ деталей производились на автоматизированном стенде АСКОН-3-КИ производства Казанского авиационного института. В результате сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований рассматриваемого процесса обработки установлено, что расхождение не превышает 15%. Адекватность теоретических формул осуществлялась по критерию Фишера. На основании результатов исследований разработаны алгоритм и методика проектирования рациональных параметров технологических процессов обработки деталей сложной конфигурации шарико-стержневым упрочнителем. Использование разработанного программного модуля системы автоматизированного проектирования технологических процессов позволило значительно сократить сроки технологической подготовки производства и обеспечить стабильное качество обрабатываемых деталей. Это делает возможным проводить технологическую подготовку в условиях цифрового производства и обеспечить значительное увеличение жизненного цикла выпускаемой продукции.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование технологического процесса, шероховатость поверхностного слоя, глубина упрочненного слоя, степень деформации, остаточные напряжения, время обработки

Для цитирования: Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Тищенко Р. Г. Технологическое обеспечение цифрового производства при обработке деталей шарико-стержневым упрочнителем // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 184–196. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-184-196>.

Technological support of digital production when processing parts using a ball-rod hardener

Mikhail A. Tamarkin^{1✉}, Elina E. Tishchenko², Roman G. Tishchenko³

¹⁻³Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹tehn_rostov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>

²lina_tishchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>

³tishenkoroma@icloud.com, <https://orcid.org/0000-001-5495-8749>

Abstract. In this work, a module of an automated design system for machining using a multi-contact vibrating impact tool, namely a ball-rod hardener, was developed. The technological process of machining using such a hardener was studied. The performance and production cost of machining expressed as the duration and cost of achieving the specified hardening parameters were used to assess the efficiency. The specified geometric, physical and mechanical parameters of the surface layer of processed parts were used as restrictive functions. Residual stresses in samples were determined by Davydenko's method. The Microsoft Visual Studio software and the C# programming language were used to automate process design. The studies established that the quality of the surface layer of parts is influenced by the main technological parameters (the impact energy of the indenter, the number of rods and grinding radius and tension in processing). The adequate theoretical models of developing various quality parameters of the surface layer of machined parts and processing time were obtained from the theoretical studies of the machining process using a ball-rod hardener. The obtained dependence was subjected to a comprehensive verification under the operating conditions at PJSC "Rostvertol" (Rostov-on-Don). Residual stresses in the surface layer of the BRH machined parts were measured using the ASCON-3-KI automated test stand produced by the Kazan Aviation Institute. The discrepancy between the theoretical and experimental results of the machining process was less than 15%. The adequacy of the theoretical formulas was assessed by Fisher's criterion. Based on the research findings, an algorithm and method of designing rational parameters for machining parts of complex geometry using a ball-rod hardener were developed. Using this software for the automated design of technological processes allowed the time of manufacturing preparation to be reduced and the stable quality of machined parts to be ensured. This offers manufacturing preparation in a digital production environment and ensures a significant increase in the useful life of manufactured products.

Keywords: computer-aided design of the technological process, surface layer roughness, hardened layer depth, deformation degree, residual stresses, processing time

For citation: Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Tishchenko R. G. Technological support of digital production when processing parts using a ball-rod hardener. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):184-196. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-184-196>.

ВВЕДЕНИЕ

Шарико-стержневой упрочнитель (ШСУ) является новым устройством, предназначенным для обработки поверхности деталей поверхностно-пластическим деформированием. Универсальное приспособление позволяет производить обработку не только плоских поверхностей, но и фасонных, обладающих небольшими перепадами высот. Приспособление изобретено на кафедре «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета под руководством профессора А. П. Бабичева [1]. Технологические возможности устройства сочетают преимущества вибрационной обработки (обработка гибкой гранулированной средой) и значительные усилия соударения, харак-

терные для чеканки и дробеструйной обработки [2–24]. Однако следует отметить, что в связи с недостаточной полнотой теоретического описания процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем затруднена возможность автоматизированного проектирования и оптимизации технологических процессов с использованием рассматриваемого метода обработки.

Целью настоящих исследований является разработка модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов обработки шарико-стержневым упрочнителем для внедрения цифрового производства при финишной обработке деталей сложного профиля поверхностно-пластическим деформированием на основе

результатов многолетних теоретических и экспериментальных исследований процесса.

Описание конструкции устройства.

ШСУ содержит оригинальную часть в виде пакета стержней инденторов, имеющих форму цилиндра, с одной стороны которого расположена полусфера определенного радиуса, а второй плоский конец соприкасается с совокупностью металлических шариков, заключенных в ограниченном объеме рабочего цилиндра. Рабочий цилиндр соединяется с корпусом стандартного пневмомолотка, обычно используемого при осуществлении заклепочных соединений (рис. 1). Ударник пневмомолотка осуществляет периодическое воздействие высокой частоты по совокупности металлических шариков. Ударно-волновые импульсы передаются шариками на стержни индентора, которые удерживаются в рабочем цилиндре специальным цанговым зажимом. При надавливании устройства на фасонную поверхность обрабатываемой детали цанга разжимается, и пакет инденторов принимает форму этой поверхности (в случае незначительного перепада высот).

Устройство ШСУ подводится к поверхности детали, и за счет упругого элемента осу-

ществляется натяг при обработке. Благодаря этому ШСУ может использоваться для создания нового профиля микронеровностей, имеющих большую величину радиусов выступов (характерную для обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД)) и упрочнения поверхностного слоя детали, что позволяет значительно повысить ее эксплуатационные свойства.

При разработке конструкции ШСУ решалась задача создать эффективное мобильное устройство для упрочнения участков поверхности деталей, являющихся наиболее опасными при циклическом нагружении, либо участков мест крепления деталей при всесторонней обработке методами ППД, которые невозможно обработать традиционными методами. Малые габариты и мобильность разработанного устройства позволяют использовать его при обработке вручную либо в качестве приспособления, крепящегося к суппорту токарного станка, либо к шпинделю универсально-фрезерного станка, что позволяет создавать заданную величину натяга при обработке и осуществлять регулирование скорости подачи.

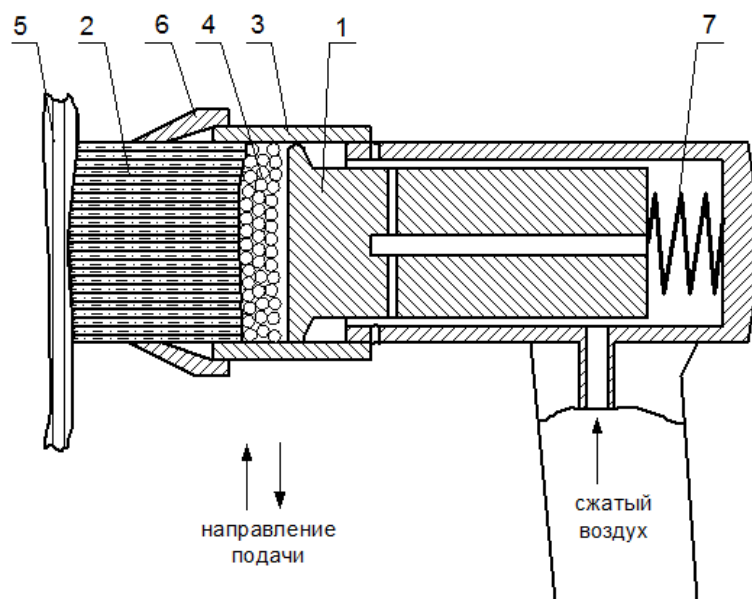


Рис. 1. Схема многоконтактного виброударного инструмента шарико-стержневого упрочнителя:

1 – силовой привод с ударником, 2 – пакет круглых стержней, 3 – рабочий цилиндр,
4 – стальные шары, 5 – обрабатываемая деталь, 6 – цанговый зажим, 7 – упругий элемент
Fig. 1. Diagram of a multi-contact vibro-impact tool of a ball-rod hardener:
1 – a power drive with a striker, 2 – a package of round rods, 3 – a power cylinder, 4 – steel balls, 5 – a treated workpiece,
6 – a collet clamp, 7 – an elastic element

Для проектирования технологических процессов обработки ШСУ необходимо получить адекватные модели формирования параметров качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей [2–8]. Целью проведения исследований является выявление зависимостей, описывающих влияние режимов обработки, и конструктивных параметров устройства на геометрические и физико-механические свойства поверхностного слоя упрочненных деталей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для формирования заданной величины показателей качества поверхности обрабатываемой детали проведены теоретические исследования зависимости этих показателей режимов обработки и конструктивных параметров ШСУ [2–8].

Результаты теоретических исследований. При проведении теоретических исследований с использованием результатов известных работ [6–19] получены математические модели для определения

– шероховатости обработанной поверхности

$$Rz = 0,03 \sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{D \cdot N \cdot HB^{1,12}}}; \quad (1)$$

– глубины упрочненного слоя

$$Hs = \sqrt[8]{\left(\frac{E_y \cdot \eta}{D \cdot N \cdot HB^{1,12}} \right)^3 \cdot \frac{1}{D}}; \quad (2)$$

– степени пластической деформации

$$\varepsilon = 1,134 \sqrt{\frac{E_y \cdot \eta}{D^3 \cdot N \cdot HB^{1,12}}}, \quad (3)$$

где E_y – энергия удара бойка; N – число стержней в пакете; HB – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю; η – коэффициент полезного действия устройства, зависящий от ряда факторов (натяг при об-

работке, количество слоев шариков и т.п.); D – диаметр сферической заточки стержня индентора.

Одним из важнейших вопросов при изучении методов обработки ППД являются исследования по изучению процесса формирования остаточных напряжений [20–24]. В одном из основных научных трудов по исследованию ШСУ [20] приведены данные о формировании остаточных напряжений и их изменении по глубине поверхностного слоя. Обработка ШСУ позволяет достигать сжимающих остаточных напряжений значительной величины с распределением по глубине до 0,5 мм. Однако следует отметить, что теоретические зависимости, позволяющие рассчитывать величину этих напряжений, до сих пор не разработаны, что сдерживает применение шарико-стержневого упрочнения для обработки ответственных деталей машин, функционирующих в условиях знакопеременных нагрузок.

Анализ научных трудов по разработке теории динамических методов ППД показал, что вывод зависимости для теоретического расчета внутренних напряжений поверхностного слоя обработанных деталей разработан профессором Ю. Р. Копыловым применительно к вибрационной отделочно-упрочняющей обработке [21]. Распространив аналогичную методику на теоретические исследования обработки ШСУ, авторы предлагают зависимость для расчета формирования остаточных напряжений поверхностного слоя обработанных деталей в следующем виде [3, 4, 6]:

$$\sigma_0 = k_u k_\sigma \left(\frac{E_y}{\left(\frac{Dd}{2(D+d)} \right)^3} \right)^{\frac{1}{5}} \times \left(\frac{1 - \nu_d^2}{E_d} + \frac{1 - \nu_c^2}{E_c} \right)^{\left(-\frac{4}{5} \right)}, \quad (4)$$

где k_u – коэффициент, учитывающий особенности формирования остаточных напря-

жений при обработке ШСУ (определяется экспериментально); k_σ – коэффициент, учитывающий способность материала к упрочнению; D и d – диаметры, соответственно, заточки стержня и отпечатка на детали; ν_d и ν_c – коэффициенты Пуассона для детали и стержня; E_d и E_c – модули упругости первого рода для детали и стержня.

При технологическом проектировании одной из главных задач является расчет времени обработки. Его величина определяет производительность используемого метода обработки, конструктивные параметры и количество единиц используемого оборудования. Разработана теоретическая модель для определения времени обработки за один проход (опыт применения обработки ШСУ показывает, что в большинстве случаев можно ограничиться однократным проходом устройства по поверхности детали):

$$t = \frac{L_{уч} - L_{нак}}{S} \cdot \frac{B_{уч}}{B_{нак}}, \quad (5)$$

где $L_{уч}$ – длина обрабатываемого участка; $L_{нак}$ – размер пакета стержней в направлении подачи; S – подача; $B_{уч}$ – ширина обрабатываемого участка; $B_{нак}$ – размер пакета стержней в направлении, перпендикулярном направлению подачи.

Проведен значительный комплекс экспериментальных исследований.

Результаты экспериментальных исследований. Данные экспериментов и их сравнение с результатами теоретических расчетов представлены на рис. 1–3. Теоретические зависимости показаны сплошными кривыми, окружностями и квадратами – средние арифметические величины, полученные при проведении экспериментов. Рассчитаны доверительные интервалы (доверительная вероятность 95%). Проведенная проверка адекватности теоретических зависимостей по критерию Фишера показала положительный результат.

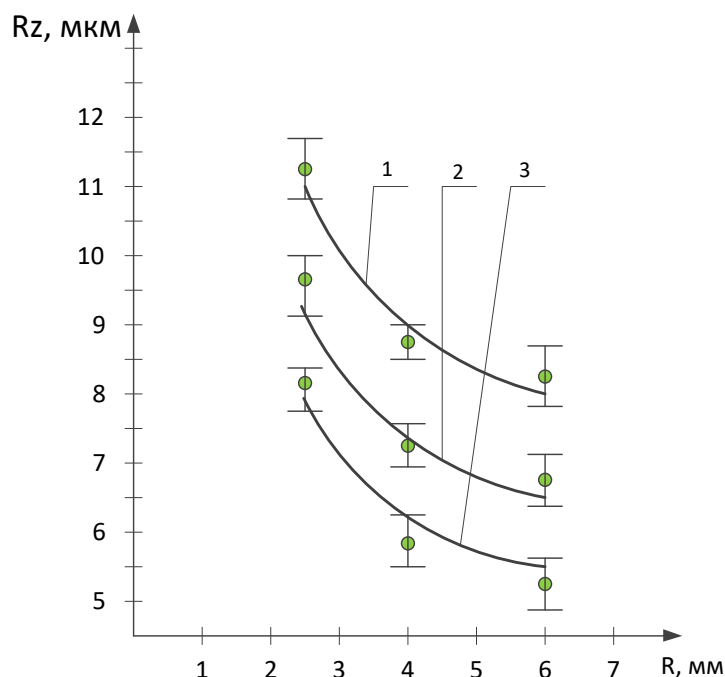


Рис. 2. Влияние радиуса сферической заточки на шероховатость обработанной поверхности ($N = 19$, $\eta = 0,7$):

1 – материал образцов – Д16, 2 – материал образцов – В95, 3 – материал образцов – сталь 45

Fig. 2. Influence of the radius of spherical sharpening on the treated surface roughness

($N = 19$, $\eta = 0,7$): 1 – sample material – Д16, 2 – sample material – В95, 3 – sample material – steel 45

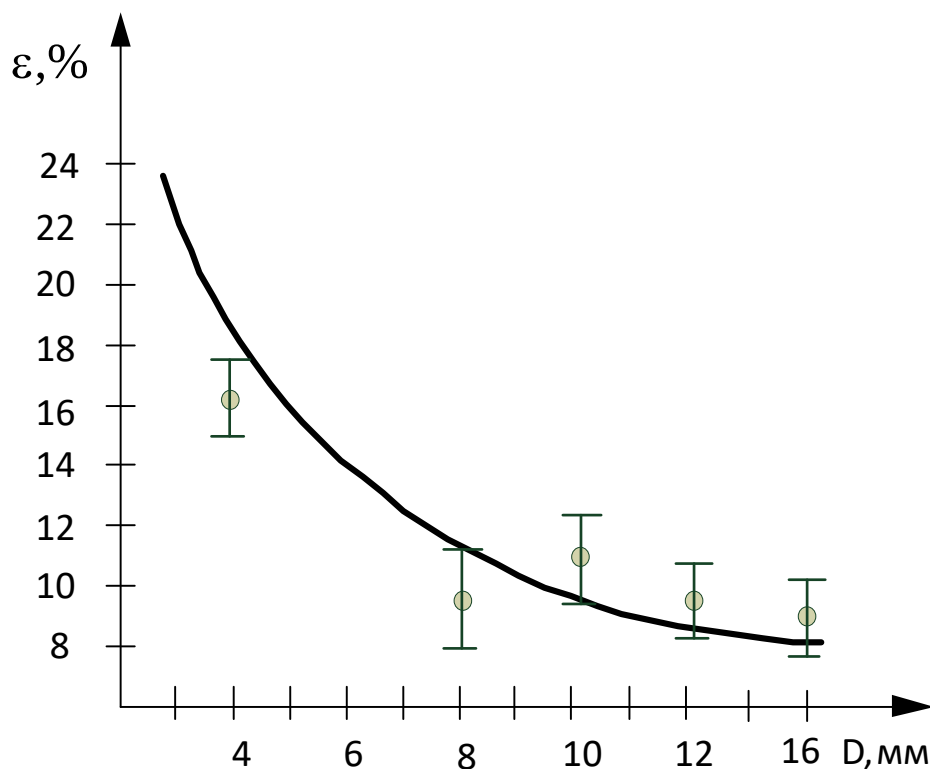


Рис. 3. Влияние диаметра заточки стержня на степень деформации для алюминиевого сплава B95:
 число стержней $N = 40$, натяг – 1,5 мм

Fig. 3. Influence of the rod sharpening diameter on the deformation degree of the aluminum alloy B95:
 number of rods $N = 40$, interference – 1.5 mm

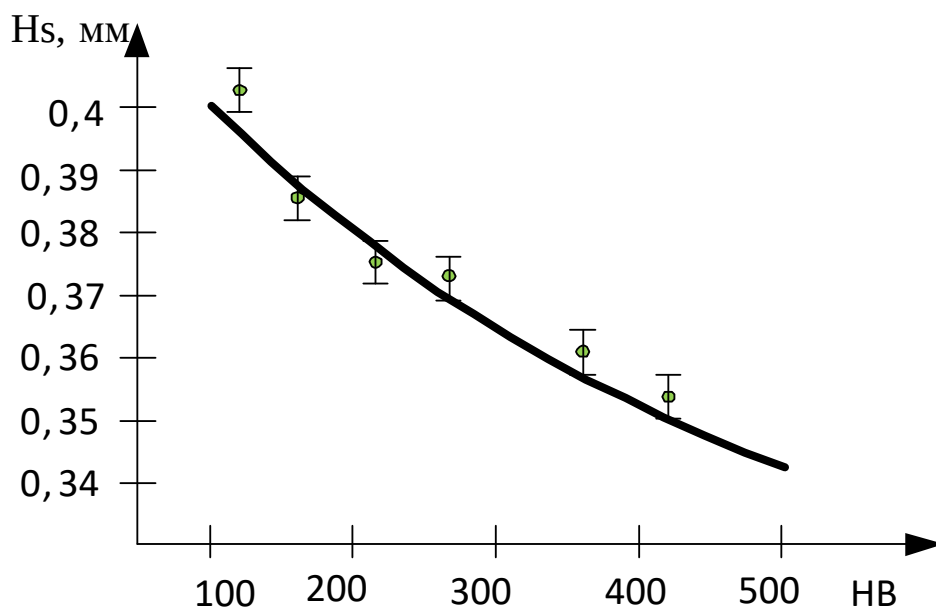


Рис. 4. Влияние твердости по Бринеллю на глубину упрочненного слоя
 (число стержней $N = 19$, энергия удара $E_y = 2,5$ Дж, $\eta = 0,7$, диаметр заточки сферы – $D = 3$ мм)
 Fig. 4. Influence of Brinell hardness on the depth of the hardened layer
 (number of rods $N = 19$, impact energy $E_y = 2.5$ J, $\eta = 0.7$, sphere sharpening diameter $D = 3$ mm)

Влияние твердости по Бринеллю на глубину упрочненного слоя рассмотрено на рис. 4.

Полученная зависимость прошла комплексную экспериментальную проверку в условиях ПАО «Роствертол». Измерения остаточных напряжений в поверхностном слое обработанных ШСУ деталей производились на автоматизированном стенде АС-КОН-3-КИ производства Казанского авиационного института. Материал образцов – алюминиевый сплав В96. Образцы в форме прямоугольного параллелепипеда размерами 200×100×20 мм подвергались обработке ШСУ. Пакет стержней с радиусом сферической заточки 4, 8, 12 и 16 мм использовался при осуществлении натяга 1,5 мм и 4,5 мм, затем из обработанных параллелепипедов электроискровым методом вырезались образцы-пластины, на которых остаточные напряжения определялись по методу Давиденкова. Величина сжимающих остаточных напряжений поверхностного слоя достигает 200 МПа, что значительно превышает их величину, полученную при вибрационной отделочно-упрочняющей обработке. Полученные значения сопоставлялись с результатами теоретических расчетов по зависимости (4). Путем деления результатов экспериментальных исследований на результаты теоретических расчетов рассчитывались значения коэффициента k_u . Как правило, они попадали в промежуток 1,5–1,7. Для дальнейших расчетов рекомендуется значение 1,6.

Результаты сравнения представлены на рис. 5 а и б.

Проектирование модуля системы автоматизированного проектирования технологических процессов. Для автоматизированного проектирования технологических процессов обработки ШСУ разработан программный продукт с использованием среды разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на языке программирования С#, который позволяет по характеристике обрабатываемой детали выбрать средства технологического оснащения, технологические режимы и характеристики рабочей среды при обработке ШСУ. Программа имеет удобный интерфейс (рис. 6) и позволяет в

диалоговом режиме задавать материал, конструктивные особенности обрабатываемой детали, необходимые параметры качества поверхностного слоя, в автоматическом режиме проектировать технологический процесс, выполняя оптимизацию по производительности (времени) обработки (рис. 7).

На основании вышесказанного разработана методика автоматизации и оптимизации технологического проектирования обработки ШСУ:

1. Задаются граничные значения необходимой величины геометрических и физикомеханических параметров обработки, соответствующих конструкторским требованиям, размеры и конструктивные особенности обрабатываемой поверхности, а также материал, подвергаемый обработке.

2. Производится выбор пневомолотка и обрабатывающего устройства (величина пучка стержней, объем шариков и т.п.). Количество стержней в насадке зависит, как правило, от величины обрабатываемого участка при местном упрочнении.

3. Назначаются натяг при обработке, диаметр заточки стержня и диаметр стержня. Повышение твердости обрабатываемого материала вызывает необходимость увеличения натяга и уменьшения диаметров заточки стержней.

4. Включается расчетный блок системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), определяющий величину шероховатости обработанной поверхности, глубину упрочненного слоя, степень деформации, остаточные напряжения по формулам (1)–(4). Расчет параметров качества поверхности позволяет получить множество вариантов технологических процессов. Несоответствующие требованиям конструктора варианты отбрасываются.

5. Для оставшихся вариантов определяется время обработки по зависимости (5). Программа осуществляет поиск вариантов технологических процессов, которые обеспечивают заданные параметры качества поверхностного слоя, и предлагает пользователю варианты, начиная с того, который обеспечивает минимальное время при обработке. Для предложенных вариантов выда-

ются рекомендуемые параметры устройства ШСУ и режимов обработки. Разработка нескольких вариантов позволяет применять в условиях конкретного предприятия уже имеющиеся средства технологического оснащения без дополнительных затрат

на их приобретение.

Планируется внедрение модуля разрабатываемой САПР ТП на ведущих предприятиях машиностроительного профиля. Ведутся переговоры по апробации программного продукта.

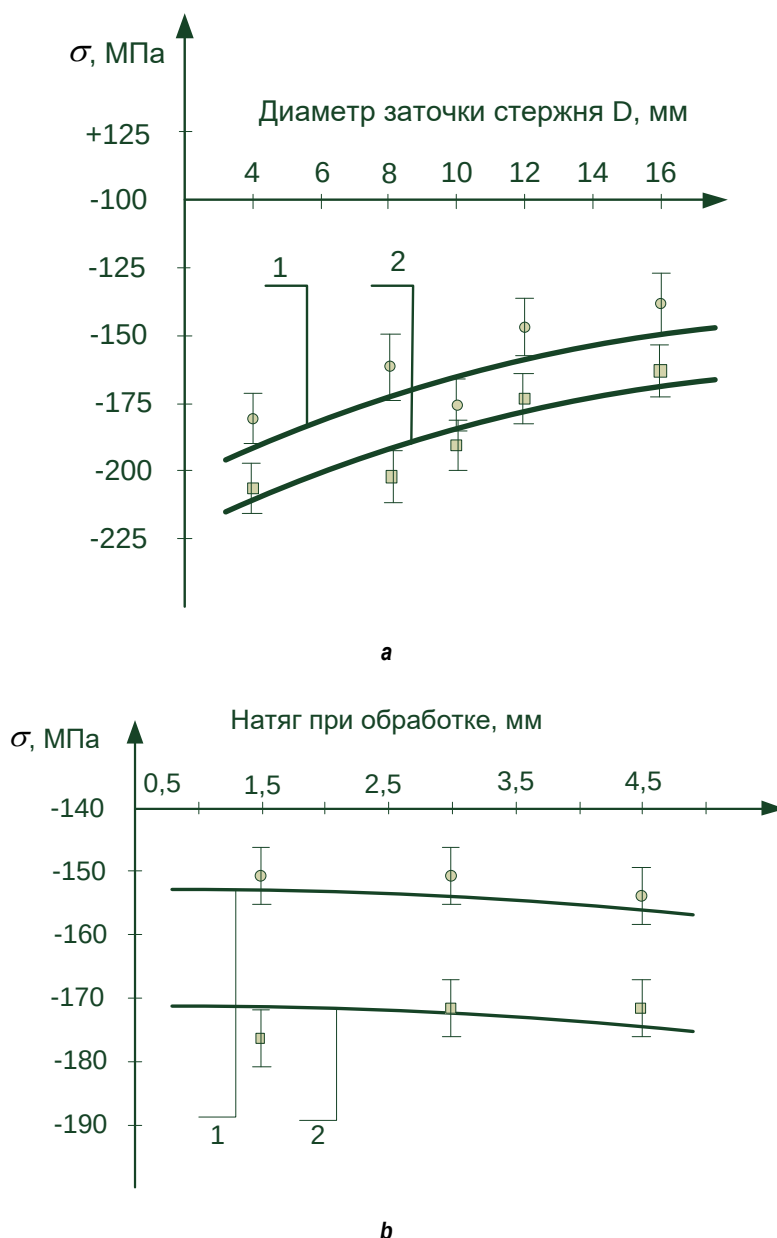


Рис. 5. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований влияния технологических параметров на величину остаточных напряжений при обработке для алюминиевого сплава B95: а – влияние диаметра заточки (натяг – 1,5 мм, число стержней: 1 – N = 19 (●), 2 – N = 40 (■)); б – Влияние натяга при обработке (диаметр заточки стержня D = 16, число стержней: 1 – N = 19 (●), 2 – N = 40 (■))

Fig. 5. Comparison of the results of theoretical and experimental studies of the effect of technological parameters on the amount of residual stresses when processing the aluminum alloy B95: a – influence of the sharpening diameter (interference – 1.5 mm, number of rods: 1 – N = 19 (●), 2 – N = 40 (■)); b – influence of the interference under processing (rod sharpening diameter D = 16, number of rods: 1 – N = 19 (●), 2 – N = 40 (■))

Проектирование технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем

Введите исходные данные для проектирования:

Имеются ли у детали отверстия или труднодоступные для обработки места? ☐

Введите заданные параметры поверхностного слоя

R_z 5.5 мкм σ_0 170 МПа H_s 0.45 мм ϵ 12 %

Выберите тип молотка ☒ КПМ-14М ☒ КПМ-24М ☒ КПМ-34М ☐ КПМ-42М

Введите возможное количество стержней в пакете 20 шт

Выберите диаметр заточки стержня ☐ 2мм ☐ 4мм ☐ 6мм ☒ 8мм ☒ 10мм ☐ 12мм

Введите диаметр стержня ☐ 2мм ☐ 3мм ☒ 4мм ☐ 5мм ☒ 6мм

Выберите натяг при обработке 4 мм

Введите материал обрабатываемой детали B95

Введите размеры обрабатываемой поверхности длина 20 мм ширина 60 мм

Задайте соотношение длины и ширины пакета стержней 2

Сбросить Обработать

Рис. 6. Панель ввода исходных данных для проектирования технологического процесса
Fig. 6. Initial data input panel for technological process design

Проектирование технологического процесса обработки шарико-стержневым упрочнителем

Предлагаемое количество вариантов технологических процессов 6

Минимальное время обработки обеспечивает вариант технологии 1

Для получения заданных параметров обработки детали предлагается

Вариант 1

Рекомендуемый диаметр заточки стержня 8 мм

Рекомендуемый диаметр стержня 4 мм

Рекомендуемое число стержней в пакете 20 шт

Рекомендуемая модель молотка КПМ-24М мин

Рекомендуемый натяг при обработке 4 мм

Рекомендуемая подача 2 мм/мин

Время обработки составит 95 сек

Сохранить Показать следующий вариант Заккрыть

Рис. 7. Панель вывода варианта технологии обработки детали
Fig. 7. Output panel of the part processing technology variant

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные теоретические модели прошли комплексную экспериментальную проверку. Установлено, что различие результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных не превышает 20%. Проверка адекватности осуществлялась по критерию Фишера. Установлено, что полученные зависимости адекватны.

2. Доказано, что при обработке ШСУ формируются остаточные напряжения сжатия, повышается микротвердость поверхностного слоя. Такие параметры поверхностного слоя обеспечивают значительное по-

вышение эксплуатационных свойств ответственных деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузок. Величина сжимающих остаточных напряжений достигает 150–200 МПа, что значительно превышает величину остаточных напряжений, полученных при вибрационной обработке.

3. Использование предложенного модуля САПР ТП при технологическом проектировании позволит значительно сократить трудоемкость технологической подготовки производства и повысить эффективность обработки ответственных деталей машин.

Список источников

1. Пат. № 179570, Российская Федерация, U1, B24B 39/00. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, Д. Д. Бирюков, Л. О. Лисицкий. № 2017133971. Заявл. 29.09.2017; опубл. 17.05.2018.
2. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E., Melnikov A. Surface quality assurance and process reliability in the processing with a ball-rod hardener // State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2020: 13th International Scientific and Practical Conference. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. P. 05008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505008>.
3. Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Новокрещенов С. А., Морозов С. А. Разработка методики проектирования технологического процесса обработки шарикостержневым упрочнителем с учетом формирования сжимающих остаточных напряжений // Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Vol. 2. № 2. С. 143–149. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-2-143-149>.
4. Tamarkin M., Tishchenko E., Chukarina I., Sosnitskaya T. Parts processing technology for transport engineering // VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing / eds. Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Cham: Springer, 2020. Vol. 1115. P. 913–922. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_90.
5. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E. Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery // State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2021: 14th International Scientific and Practical Conference. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 273. P. 07032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127307032>.
6. Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Исаев А. Г. Обеспечение акустической безопасности при обработке плоских деталей шарикостержневым упрочнителем // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 2. С. 12–19. https://doi.org/10.12737/article_5ac49dc30826b3.63726809.
7. Beskopylnyi A., Meskhi B., Beskopylny N., Chukarina I., Isaev A., Veremeenko A. Strengthening of welded joints of load-bearing structures of robotic systems with ball-rod hardening // Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies / eds. M. Shamtsyan, M. Pasetti, A. Beskopylny. Singapore: Springer, 2022. Vol. 247. P. 1–11. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_1.
8. Beskopylny A., Meskhi B., Veremeenko A., Isaev A. Influence of boundary conditions on the strengthening technology of a welded joint with a ball-rod hardener // International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series. 2020. Vol. 1001. P. 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012047>.
9. Lebedev V. A., Chunakhova L. V., Kirichek A. V. Effectiveness of application of additional strengthening processing of surface plastic deformation on increase in fatigue life of parts // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2019. P. 17–25. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_3.
10. Chigirinskii Yu. L. Surface quality after different treatments // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31. Iss. 8. P. 816–819. <https://doi.org/10.3103/S1068798X11080065>.
11. Blumenstein V., Makhalov M. The Metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes // Innovations in Mechanical Engineering: 10th International Scientific and Practical Conference. MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 297. P. 05001. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929705001>.
12. Smolentsev V., Safonov S. The technological methods of surface layer modification in construction materials // International Conference on Modern Trends in

Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 01077. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901077>.

13. Makhalov M. S., Blumenstein V. Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration // Solid State Phenomena. 2022. Vol. 328. P. 27–37. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.328.27>.

14. Mahalov M. S., Blumenstein V. Yu. The surface layer mechanical condition and residual stress forming model in surface plastic deformation process with the hardened body effect consideration // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2017. Vol. 253. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012009>.

15. Blumenstein V., Makhalov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes // Innovations in Mechanical Engineering: 10th International Scientific and Practical Conference. MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 297. P. 05001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705001>.

16. Mahalov M. S., Blumenstein V. Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes // 7th International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering. Materials Science and Engineering. IOP Conference Series. 2016. Vol. 253. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004>.

17. Plotnikov A. L., Chigirinskii Yu. L., Frolov E. M., Krylov E. G. Formulating CAD/CAM modules for calculating the cutting conditions in machining // Russian Engineering Research. 2009. Vol. 29. No. 5. P. 512–517.

<https://doi.org/10.3103/S1068798X09050207>.

18. Chigirinskii Y. L. Formalized approaches in technological design // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. No. 3. P. 305–307. <https://doi.org/10.3103/S1068798X10030251>.

19. Chigirinskii Yu. L., Firsov I. V., Chigirinskaya N. V. Information system for the design of machining processes // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. No. 1. P. 49–51. <https://doi.org/10.3103/S1068798X14010031>.

20. Тамаркин М. А., Щерба Л. М., Тищенко Э. Э. Проектирование технологических процессов виброударной отделочной обработки шарикостержневым упрочнителем // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 7. С. 13–20.

21. Копылов Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. 568 с.

22. Кудрявцев И. В. и др. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом. М.: Изд-во НИИ ИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. 144 с.

23. Agapov S. I., Sidyakin Yu. I., Korpelyanskiy O. F. Calculation of roughness parameters during ultrasonic hobbing from the viewpoint of the theory of elastic-plastic contact // Materials Science Forum. 2019. Vol. 973. P. 170–173. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.973.170>.

24. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. М.: Изд-во «Металлургия», 1965. 172 с.

References

1. Babichev A. P., Motrenko P. D., Biryukov D. D., Lisickij L. O. A device for hardening and finishing treatment. Patent RF, no. 179570; 2018. (In Russ.).
2. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E., Melnikov A. Surface quality assurance and process reliability in the processing with a ball-rod hardener. In: *State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2020: 13th International Scientific and Practical Conference*. E3S Web of Conferences. 2020;175:05008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505008>.
3. Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Novokreshchenov S. A., Morozov S. A. Development of design methodology of technological process of ball-rod hardening with account for formation of compressive residual stresses. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*. 2020;2(2):143-149. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-143-149>.
4. Tamarkin M., Tishchenko E., Chukarina I., Sosnitskaya T. Parts processing technology for transport engineering. In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds.). *8th International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer; 2020. vol. 1115, p. 913-922. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_90.
5. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E. Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery. In: *State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2021: 14th International Scientific and Practical Conference*. E3S Web of Conferences. 2021;273:07032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127307032>.
6. Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Isaev A. G. Acoustic safety support at machining flat parts with ball-rod hardener. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bryansk State Technical University*. 2018;2:12-19. https://doi.org/10.12737/article_5ac49dc30826b3.63726809.
7. Beskopylnyi A., Meskhi B., Beskopylny N., Chukarina I., Isaev A., Veremeenko A. Strengthening of welded joints of load-bearing structures of robotic systems with ball-rod hardening In: Shamtsyan M., Pasetti M., Beskopylny A. (eds.). *Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Singapore: Springer; 2022, vol. 247, p. 1-11. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_1.
8. Beskopylny A., Meskhi B., Veremeenko A., Isaev A. Influence of boundary conditions on the strengthening technology of a welded joint with a ball-rod hardener. In: *International Scientific and Practical Conference Environ-*

mental Risks and Safety in Mechanical Engineering: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series. 2020;1001:012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012047>.

9. Lebedev V. A., Chunakhova L. V., Kirichek A. V. Effectiveness of application of additional strengthening processing of surface plastic deformation on increase in fatigue life of parts. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Cham: Springer; 2019, p. 17-25. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_3.

10. Chigirinskii Yu. L. Surface quality after different treatments. *Russian Engineering Research.* 2011;31(8):816-819. <https://doi.org/10.3103/S1068798X11080065>.

11. Blumenstein V., Makhalov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes. In: *Innovations in Mechanical Engineering: 10th International Scientific and Practical Conference. MATEC Web of Conferences.* 2019;297:05001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705001>.

12. Smolentsev V., Safonov S. The technological methods of surface layer modification in construction materials. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences.* 2017;129:01077. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901077>.

13. Makhalov M. S., Blumenstein V. Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration. *Solid State Phenomena.* 2022;328:27-37. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.328.27>.

14. Makhalov M. S., Blumenstein V. Yu. The surface layer mechanical condition and residual stress forming model in surface plastic deformation process with the hardened body effect consideration. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series.* 2017;253:012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012009>.

15. Blumenstein V., Makhalov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes. In: *Innovations in Mechanical Engineering: 10th International Scientific and Practical Conference. MATEC Web of Conferences.* 2019;297:05001.

<https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705001>.

16. Makhalov M. S., Blumenstein V. Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes. In: *7th International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering. Materials Science and Engineering. IOP Conference Series.* 2016;253:012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004>.

17. Plotnikov A. L., Chigirinskii Yu. L., Frolov E. M., Krylov E. G. Formulating CAD/CAM modules for calculating the cutting conditions in machining. *Russian Engineering Research.* 2009;29(5):512-517. <https://doi.org/10.3103/S1068798X09050207>.

18. Chigirinskii Y. L. Formalized approaches in technological design. *Russian Engineering Research.* 2010;30(3):305-307. <https://doi.org/10.3103/S1068798X10030251>.

19. Chigirinskii Yu. L., Firsov I. V., Chigirinskaya N. V. Information system for the design of machining processes. *Russian Engineering Research.* 2014;34(1):49-51. <https://doi.org/10.3103/S1068798X14010031>.

20. Tamarkin M. A., Shcherba L. M., Tishchenko E. E. Designing technological processes of vibro-impact finishing with a ball-rod hardener. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings.* 2005;7:13-20. (In Russ.).

21. Kopylov Yu. R. Dynamics of vibroimpact hardening processes. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2011, 568 p. (In Russ.).

22. Kudryavtsev I. V., et al. Improving hardness and durability of large machine parts by surface work hardening. *Povyshenie prochnosti i dolgovechnosti krupnykh detalej mashin poverhnostnym naklepom.* Moscow: Research Institute of Information on Heavy Power and Transport Engineering; 1970, 144 p. (In Russ.).

23. Agapov S. I., Sidiyakin Yu. I., Korpelyanskiy O. F. Calculation of roughness parameters during ultrasonic hobbing from the viewpoint of the theory of elastic-plastic contact. *Materials Science Forum.* 2019;973:170-173. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.973.170>.

24. Drozd M. S. *Non-destructive determination of metal mechanical properties.* Moscow: Metallurgiya; 1965, 172 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тамаркин Михаил Аркадьевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технология машиностроения»,
Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Тищенко Элина Эдуардовна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технология машиностроения»,
Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Tamarkin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Mechanical Engineering Technology,
Don State Technical University,
1 Gagarin sq., Rostov-on-Don 344000, Russia

Elina E. Tishchenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology,
Don State Technical University,
1 Gagarin sq., Rostov-on-Don 344000, Russia

Тищенко Роман Геннадьевич,
студент,
Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Roman G. Tishchenko,
Student,
Don State Technical University,
1 Gagarin sq., Rostov-on-Don 344000, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена после рецензирования 06.05.2022; принята к публикации 06.06.2022.

Information about the article

The article was submitted 03.02.2022; approved after reviewing 06.05.2022; accepted for publication 06.06.2022.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-197-216>

Разработка метода определения гибкости электроэнергетической системы с ветропарками на базе искусственных нейронных сетей

Елена Сергеевна Аксаева^{1✉}, Анна Михайловна Глазунова²^{1,2} Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия¹aksaeva@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6819-7474>²glazunova@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7288-6168>

Резюме. Цель исследования – представление метода определения гибкости электроэнергетической системы в режиме онлайн с помощью искусственных нейронных сетей разных структур. Для быстрого вычисления показателя гибкости электроэнергетической системы используется разработанный алгоритм, в который встроена искусственная нейронная сеть с разными парадигмами обучения. Приемлемое время получения результатов обеспечивается разделением процесса вычисления гибкости на процессы, выполняемые офлайн и онлайн. Для обучения нейронных сетей были использованы методы обучения искусственных нейронных сетей. Многослойный персептрон обучается методом обратного распространения ошибки. Обучение нейронной сети Кохонена выполняется по правилу «победитель забирает все». В качестве меры близости между исследуемыми векторами используется Евклидово расстояние. Разработан алгоритм анализа результатов двух типов искусственных нейронных сетей с разными структурами на предмет выбора оптимальной структуры каждого типа нейронной сети, с точки зрения рекомендации к их применению в режиме реального времени, при определении гибкости электроэнергетической системы. Апробация предложенного алгоритма была выполнена на 6-узловой схеме по сценарию: вычислить гибкость данной системы, функционирующей в разных режимах. Анализ критерия показал, что структура многослойного персептрона с 16 нейронами в скрытом слое и структура нейронной сети Кохонена с девятью выходными нейронами являются оптимальными для определения установившегося режима с минимальной гибкостью в режиме реального времени. Анализ результатов показал, что величина гибкости системы не остается постоянной в разное время суток. Искусственные нейронные сети могут быть применены при определении гибкости электроэнергетической системы в режиме реального времени.

Ключевые слова: гибкость, электроэнергетические системы, искусственные нейронные сети, онлайн, установившийся режим, управление

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

Для цитирования: Аксаева Е. С., Глазунова А. М. Разработка метода определения гибкости электроэнергетической системы с ветропарками на базе искусственных нейронных сетей // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 197–216. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-197-216>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Development of an artificial neural network-based method for determining the flexibility of power systems with high share of wind generation

Elena S. Aksaeva^{1✉}, Anna M. Glazunova²^{1,2} Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia¹aksaeva@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6819-7474>²glazunova@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7288-6168>

© Аксаева Е. С., Глазунова А. М., 2022

<https://ipolytech.ru>

Abstract. A method for the online determination of the resilience of an electric power system using artificial neural networks having various structures is presented. A developed algorithm comprised of an artificial neural network with multiple learning paradigms is used for the rapid calculation of the adaptability index of the electric power system. A satisfactory time for obtaining results is ensured by dividing the adaptability calculation into offline and online processes. To train the neural networks, various methods were used. The multilayer perceptron was trained using the method of backward propagation of error, while training of the Kohonen neural network was performed based on the winner-take-all rule. Euclidean distance was used as a proximity measure between the studied vectors. An algorithm for analysing the results obtained by two types of artificial neural networks having dissimilar structures was developed in order to select their optimal structure and recommend a neural network for the real-time determination of the resilience of an electric power system. The proposed algorithm was validated on a 6-node scheme following the command script: computing the resilience of a given system, functioning in multiple modes. The criterion analysis showed that the structures of multilayer perceptron having 16 neurons in a hidden layer and Kohonen neural network having 9 output neurons represent the optimal solution for determining the steady-state mode at the minimum resilience in real-time. According to the results, the value of the resilience of the system varies over the course of a day. The possibility of using artificial neural networks for determining the resilience of electric power systems in real-time is demonstrated.

Keywords: flexibility, electric power systems, artificial neural networks, online, steady state, control

Acknowledgements: The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0001) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation 2021-2030.

For citation: Aksaeva E. S., Glazunova A. M. Development of an artificial neural network-based method for determining the flexibility of power systems with high share of wind generation. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):197-216. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-197-216>.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в результате внедрения в электроэнергетические системы (ЭЭС) возобновляемых источников энергии наблюдается растущий интерес к средствам обеспечения и мониторинга гибкости данных систем. Гибкостью ЭЭС в данной работе называется их способность сохранять баланс мощности в течение заданного времени без ввода в работу аварийных резервов. Для обеспечения гибкости необходимы резервы мощности, в качестве которых используются разные средства [1]. Авторы [2] представили информацию о видах оперативных резервов, имеющихся в США и Европе. Авторы³ описали методику, в соответствии с которой определяются минимально необходимые объемы резервов активной мощности ЭЭС России. В дополнение к резервам, имеющимся на стороне генерации, в качестве средств гибкости рассматриваются механизмы управления активными потребителями [3, 4], объединение ЭЭС [5], создание мультиэнергетических систем [6], использование разных видов накопителей энергии. Авторы [7] предложили структуру характеристики гибкости. Значение гибкости является индикатором, который может использоваться системным оператором

для сравнения его с затратами различных активных элементов, обеспечивающих услуги гибкости.

С целью оптимального управления режимами ЭЭС задачи, связанные с мониторингом гибкости ЭЭС, решаются в режиме реального времени. Основными требованиями, предъявляемыми к задачам онлайн, являются корректность результатов и быстрота вычислений. Для получения корректных результатов необходимо обрабатывать большой объем данных. Для получения быстрых ответов имеющийся объем данных необходимо обработать за короткий промежуток времени. Удовлетворение этих требований возможно за счет применения искусственных нейронных сетей (ИНС) при решении задачи определения гибкости ЭЭС.

В настоящее время существует ряд работ, посвященных определению гибкости ЭЭС с помощью ИНС. В работе [8] изложена теоретическая база для количественной оценки потенциала гибкости сети на основе машинного обучения. ИНС используются для классификации ретроспективных данных о нагрузках нескольких подстанций сети. Полученные метамоделли отдельных узлов могут быть использованы для уменьшения трудно-

³ОАО «СО ЕЭС». Методика определения минимально необходимых объемов резервов активной мощности ЕЭС России [Электронный ресурс]. URL: https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2014/metodika_opredelenija_1114.pdf. (23.10.2021).

стей, связанных с идентификацией источников, обладающих небольшим запасом гибкости. Приведение в действие множества таких источников улучшит гибкость системы. В работе [9] авторы предложили подход к представлению и передаче информации об энергетической гибкости распределенных энергоресурсов с помощью суррогатных моделей на основе искусственных нейронных сетей. Представленный подход позволяет обмениваться общей и в то же время подробной информацией о гибкости любых распределенных энергоресурсов. В статье [10] представлены обобщенные схемы моделирования гибкости распределенных энергоресурсов и оценена идея применения ИНС в предложенных схемах. В работе [11] для повышения информации о гибкости электрических сетей при наличии возобновляемых источников энергии разрабатывалась обучающаяся модель на основе нейронных сетей. С этой целью изучались способности всех известных нейронных сетей обучаться на потоковых данных. В результате предложен метод, основанный на ансамбле нейронных сетей, для улучшения характеристик обобщения за счет возможностей использования разных сочетаний исследуемых ИНС. Авторы статьи [12] предложили подход «черного ящика» для исследования гибкости виртуальной электростанции с использованием методов машинного обучения. Наличие точной информации о гибкости способствует уменьшению небалансов в системе, что сокращает финансовые штрафы. В статье приведены результаты исследований и сравнение двух методов машинного обучения: многомерная линейная регрессия и однослойная искусственная нейронная сеть. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что алгоритм линейной регрессии в среднем способен оценить гибкость с ошибкой 15%, алгоритм с однослойной ИНС оценивает гибкость с ошибкой 5,3%. Это означает, что применение ИНС для оценки гибкости ЭЭС является более целесообразным. Авторы статьи [13] предлагают усовершенствованный механизм согласования спроса и предложения в энергосетях, в которых существует неопределенность, связанная с возобновляемыми источ-

никами энергии и новыми видами потребления нагрузки. Предлагаемый механизм основан на использовании мультиагентных систем и искусственных нейронных сетей и предназначен для исследования и определения гибкости распределенных энергетических ресурсов. На основе полученной информации вырабатываются управляющие воздействия, выполнение которых требуется для компенсации возникающих неопределенностей. Авторы [14] разработали метод интегрирования искусственной нейронной сети в систему централизованного холодоснабжения, целью которого является уменьшение потребления электроэнергии за счет выявления и использования энергетической гибкости. Нейронная сеть обучается оценивать величину мощности, которая требуется каждому конкретному пользователю для процесса охлаждения. Для того чтобы оптимизировать использование ресурсов системы и гибкость возобновляемых источников энергии, авторы статьи [15] предлагают определять изменяющиеся во времени нагрузки путем объединения методов идентификации системы и нелинейной численной оптимизации. Параметры идентификационной модели связываются с данными измерений с помощью искусственных нейронных сетей, что позволяет создавать аналогичную динамику без использования методов численной оптимизации.

Целью данного исследования является представление метода определения гибкости ЭЭС в режиме онлайн с помощью ИНС. Для достижения этой цели был разработан алгоритм анализа результатов двух типов ИНС с разными структурами на предмет выбора оптимальной структуры каждого типа с точки зрения рекомендации к их применению в режиме реального времени при определении гибкости ЭЭС.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ГИБКОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для определения того, является ли ЭЭС гибкой, анализируется следующее условие:

$$F_R = R, \quad (1)$$

где F_R – величина, показывающая значение небаланса в ЭЭС, для компенсации которого с целью сохранения баланса мощности в ней не требуется ввод аварийных резервов в указанный период времени. Величина F_R вычисляется при определенном распределении генерирующих мощностей, поэтому при анализе (1) учитывается сочетание существующих небалансов. Выполнение условия (1) означает, что ЭЭС обладает гибкостью. Значение F_R вычисляется следующим образом:

$$F_R = \sum_{i=1}^R F_i; \quad (2)$$

$$P_i^{ypmin} - P_i > 0, \text{ то } F_i = 1, \text{ иначе } F_i = 0, \quad (3)$$

где P_i^{ypmin} – активная мощность в i -м узле с неопределенностью в УР с минимальной гибкостью; P_i – активная мощность в узле i в исследуемом режиме; R – количество нагрузочных узлов. Понятие «установившийся режим» (УР) с минимальной гибкостью (далее УР с минимальной гибкостью) введено в [16]. Наступление данного режима в ЭЭС означает, что при имеющемся распределении генерирующих мощностей увеличение нагрузки хотя бы в одном из узлов приведет к дефициту мощности или к использованию аварийных резервов. Последнее недопустимо по причине нарушения безопасности работы ЭЭС.

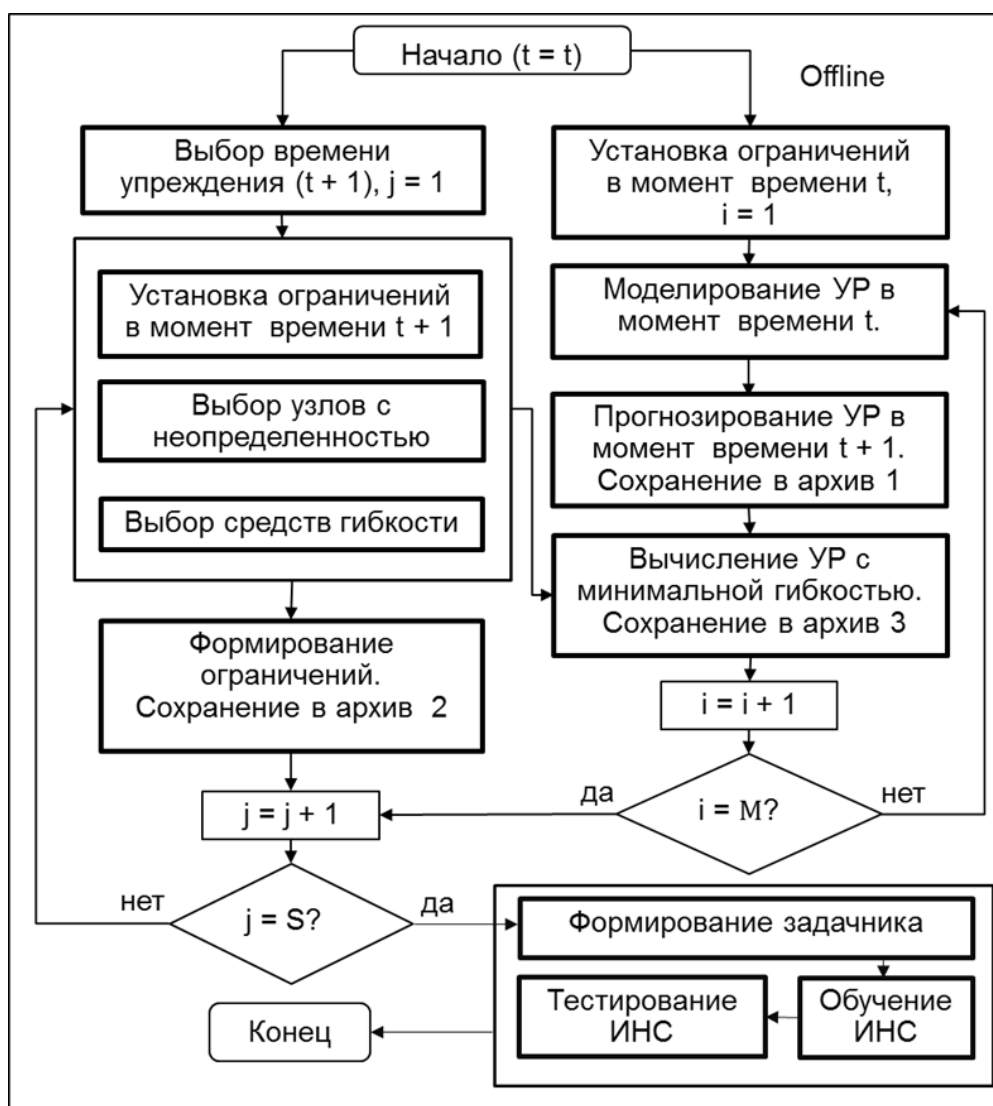


Рис. 1. Алгоритм формирования окружения искусственной нейронной сети. Офлайн (S – количество примеров в архиве 2, M – количество примеров в архиве 1)

Fig. 1. Formation algorithm of artificial neural network environment. Offline (S – the number of examples in archive 2, M – the number of examples in archive 1)

Для определения количественного показателя гибкости, которой обладает ЭЭС, применяется следующее выражение:

$$F_f = \sum_{i=1}^R (P_i^{ypmin} - P_i). \quad (4)$$

Вследствие зависимости величины гибкости ЭЭС от факторов, которые меняются достаточно часто, а иногда неожиданно, необходимо уточнять показатель гибкости в режиме онлайн. Одним из обязательных требований при решении задач онлайн является неперевышение времени, отведенного для получения результатов.

Для быстрого вычисления показателя гибкости ЭЭС предлагается алгоритм, в который встроена ИНС с парадигмой обучения без учителя [17] или с парадигмой обучения с учителем [18]. ИНС в этом алгоритме ответственна за определение параметров УР с минимальной гибкостью. Разделение про-

цесса вычисления гибкости на процессы, выполняемые офлайн (рис. 1) и онлайн (рис. 2), обеспечивает приемлемое время получения результатов.

В режиме офлайн формируется окружение или среда, в которой ИНС будут функционировать. На рис. 1 показан алгоритм моделирования УР в момент времени t , моделирования архивов УР в момент времени $t + 1$ (архив 1), ограничений (архив 2) и УР с минимальной гибкостью (архив 3). УР в момент времени $t + 1$ называется исследуемым режимом (архив 1). Из данных этих архивов создаются обучающие и тестовые выборки для обучения и тестирования ИНС.

На рис. 2 представлена укрупненная схема вычисления гибкости ЭЭС онлайн. Схема состоит из блока с исходной информацией и алгоритма, представляющего собой последовательное выполнение следующих шагов.

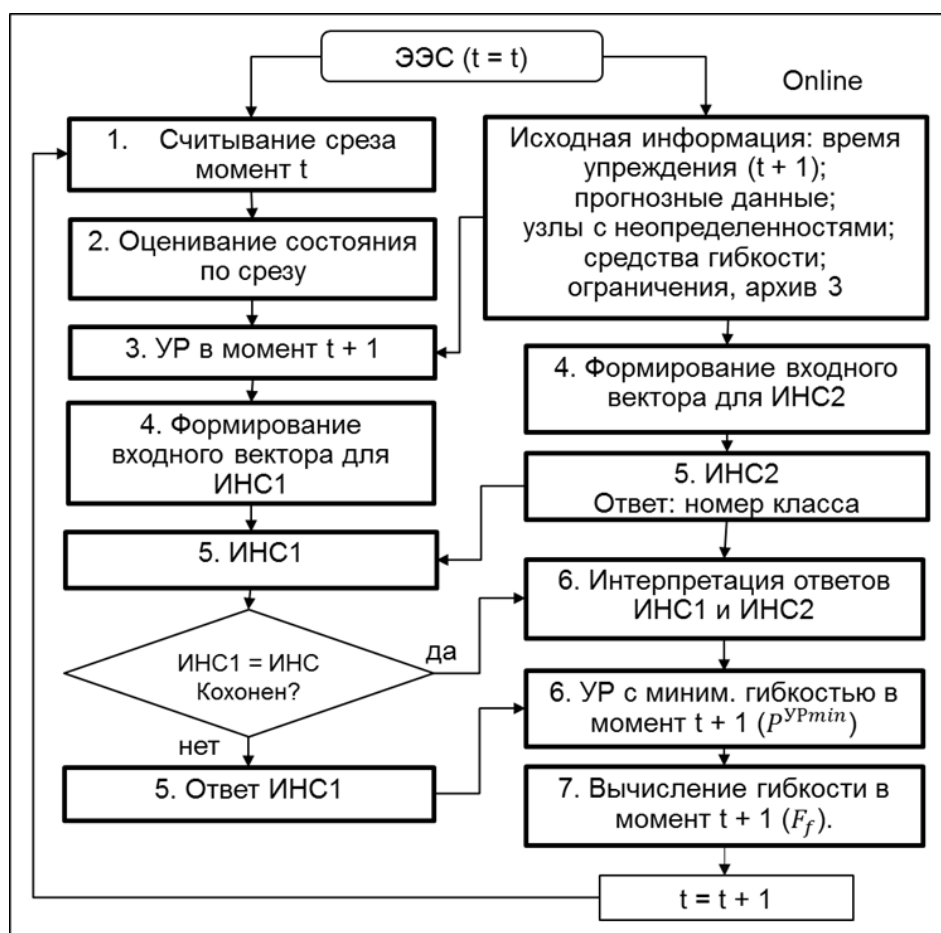


Рис. 2. Алгоритм вычисления гибкости электроэнергетической системы. Онлайн
 Fig. 2. Algorithm for calculating electric power system flexibility. Online

1. Собирается информация о состоянии ЭЭС с помощью систем сбора данных.

2. Решается задача оценивания состояния.

3. Вычисляются параметры режима на заданный $(t + 1)$ момент времени (исследуемый режим) по прогнозной информации (генерация на ветровой станции, мощность батареи, нагрузки). В качестве исходных приближений напряжения используются оценки параметров режима в момент времени t .

4. Формируются входные векторы для ИНС1 и ИНС2. Здесь под ИНС1 понимается многослойный персептрон или ИНС Кохонена, ИНС2 – это ИНС Кохонена.

5. Распознаются заданные условия (ограничения) с помощью ИНС2. ИНС2 выявляет свойства, которыми характеризуется исследуемый вектор ограничений, и распознает его как вектор, принадлежащий к одному из существующих классов. Порог схожести векторов определяется количеством классов.

6. Выполняется интерпретация ответов ИНС, то есть предлагается УР с минимальной гибкостью, соответствующий условиям, заданным входными данными. Многослойный персептрон по текущим параметрам режима и с учетом ответов ИНС2 прогнозирует параметры P_i^{ypmin} .

7. Вычисляется гибкость ЭЭС в исследуемом режиме. При этом вместе с абсолютными значениями ожидаемых нагрузок очень важным является их сочетание.

ФОРМИРОВАНИЕ ОКРУЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ (ОФЛАЙН)

Алгоритм формирования окружения.

Окружение или среда, в которой будет функционировать ИНС, формируется в следующем порядке.

1. Постановка задачи. Целью обучения ИНС является определение параметров УР с минимальной гибкостью.

2. Выбор типа ИНС. Тип ИНС выбирается в зависимости от конкретной постановки задачи. В данной работе рассматриваются две постановки задачи: прогнозирование и классификация. В связи с тем, что задачи

прогнозирования хорошо решаются многослойным персептроном, а для задач классификации часто применяются ИНС Кохонена, в работе выбираются два типа ИНС: многослойный персептрон и ИНС Кохонена.

3. Формирование обучающего задачника. Для обучения ИНС1 с парадигмой обучения с учителем формируется обучающий задачник, который состоит из входных и выходных примеров. Каждый входной пример формируется из данных архива 1 (см. рис. 1) и состоит из инъекций активной мощности в одном из исследуемых режимов P_i .

$$S1_{\text{вход}} = (P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n), \quad (5)$$

где n – количество узлов в ЭЭС.

Каждый выходной пример формируется из данных архива 3 (см. рис. 1) и состоит из инъекций активной мощности в УР с минимальной гибкостью P_i^{ypmin} .

$$S1_{\text{выход}} = (P_1^{ypmin},$$

$$P_2^{ypmin}, \dots, P_i^{ypmin}, \dots, P_n^{ypmin}). \quad (6)$$

Для обучения ИНС1 с парадигмой обучения без учителя обучающий задачник формируется из входных примеров, где каждый пример выглядит как (5).

Для обучения ИНС2 с парадигмой обучения без учителя требуются только входные данные. Каждый пример создается из ограничений, существующих в момент наступления исследуемого режима (см. рис. 1, архив 2):

$$S2_{\text{вход}} = (P_i^{\min}, P_i^{\max}, U_i^{\min},$$

$$U_i^{\max}, Q_i^{\min}, Q_i^{\max}). \quad (7)$$

В качестве ограничений используются следующие неравенства:

$$U_i^{\min} < U_i < U_i^{\max}; \quad (8)$$

$$Q_j^{\min} < Q_j < Q_j^{\max}; \quad (9)$$

$$P_j^{\min} < P_j < P_j^{\max}. \quad (10)$$

Набор примеров представляет собой обучающий задачник. Количество примеров в обучающем задачнике равно S .

4. Инициализация ИНС. На этапе инициализации определяются точности обучения и тестирования, количество циклов обучения, количество слоев, количество нейронов в каждом слое и другие стартовые параметры.

5. Обучение ИНС. ИНС обучается в течение заданного количества эпох. Затем полученные результаты оцениваются специалистом. Многослойный персептрон учится прогнозировать параметры УР с минимальной гибкостью. ИНС Кохонена выявляет отличительные и похожие свойства, которыми характеризуются исследуемые векторы (режимы для ИНС1 и ограничения для ИНС2) и классифицирует разные векторы в отдельные классы.

6. Тестирование ИНС. С целью определения способности обученной ИНС к обобщению выполняется тестирование ИНС на тестовой выборке. При допустимых ошибках тестирования обученная ИНС может быть применена для распознавания УР с минимальной гибкостью в режиме реального времени.

7. Интерпретация ответов. При решении задач прогнозирования интерпретация ответов не требуется. Ответом ИНС Кохонена является номер класса, к которому принадлежит входной вектор. В случае требования более детальной информации выполняется интерпретация ответов. В данном случае ответы ИНС1 (ИНС Кохонена) преобразуются в параметры УР с минимальной гибкостью (p_i^{UPmin}).

Точность результатов ИНС зависит от их структуры. В работе выполнено исследование по выбору оптимальной структуры ИНС1 по критерию максимальной корректности распознавания УР с минимальной гибкостью.

Определение оптимальной структуры искусственной нейронной сети многослойного персептрона

Для выбора структуры многослойного персептрона (далее ИНС_п) выполняется множество расчетов по алгоритму, показанному на рис. 3. Алгоритм состоит из двух блоков.

В начале алгоритма задается количество рассматриваемых структур ИНС, которое определяет число расчетов.

В блоке 1:

1. Задается структура ИНС_п. В данном случае под заданием структуры понимается установление числа нейронов в скрытом слое.

2. Обучается ИНС. ИНС обучается за T (период) эпох методом обратного распространения ошибки (алгоритм Левенберга–Марквардта) [19].

3. Тестируется ИНС.

4. Вычисляются ошибки тестирования и ошибки проверки.

Ошибки тестирования определяются по формулам:

1. Средняя ошибка тестирования Δ_{M1} :

$$\Delta_{M1} = \sum_{j=1}^{v_2} (\sum_{i=1}^v |\delta P_{ij}| / v) / v_2, \quad (11)$$

где δP_{ij} – ошибка обучения, вычисленная для одного параметра в примере; v_2 – количество примеров в тестовой выборке; v – количество параметров в примере; i – номер параметра в примере; j – номер примера в тестовой выборке.

2. Средняя максимальная ошибка тестирования Δ_{M2} :

$$\Delta_{M2} = \sum_{j=1}^{v_2} \max |\delta P_{ij}| / v_2. \quad (12)$$

Ошибки проверки, которые вычисляются в процессе обучения ИНС (validation error), определяются по следующим формулам:

3. Средняя ошибка Δ_{M3} :

$$\Delta_{M3} = \sum_{j=1}^{v_3} (\sum_{i=1}^v |\delta P_{ij}| / v) / v_3. \quad (13)$$

4. Средняя максимальная ошибка Δ_{M4} :

$$\Delta_{M4} \sum_{j=1}^{v_3} \max |\delta P_{ij}| / v_3, \quad (14)$$

где v_3 – количество примеров в проверочной выборке (validation dataset).

В блоке 2 вычисляется критерий и сохраняется информация о структуре ИНС, которая оказывается оптимальной среди рас-

смотренных на данный момент структур.

Критерий оптимальности записывается следующим образом:

$$\rho_{п(g)} \rightarrow \min; \quad (15)$$

$$\rho_{п(g)} = \Delta_{M1} + \Delta_{M2} + \Delta_{M3} + \Delta_{M4}, \quad (16)$$

где g – номер расчета.

По окончании работы блока 2 обученная ИНС_п имеет оптимальную структуру.

Определение оптимальной структуры искусственной нейронной сети Кохонена. На этапе подготовки ИНС Кохонена [20] выбираются структуры двух нейронных сетей: основной (далее ИНС_K1) и вспомогательной (далее ИНС_K2). Ответы вспомогательной ИНС применяются при интерпретации результатов основной ИНС. Для выбора структуры, которая обеспечит правильную интерпретацию ответов ИНС_K1 с помощью ИНС_K2 (далее оптимальная структура), выполняется множество расчетов по алгоритму, представленному на рис. 4.

В начале алгоритма задаются константы

и исходные значения некоторых переменных ρ_K^{min} . Каждому расчету соответствует определенная структура основной (ИНС_K1) и вспомогательной (ИНС_K2) нейронных сетей Кохонена.

В блоке 1 задаются структуры основной ИНС_K1 и вспомогательной ИНС_K2 нейронных сетей. Под заданием структуры понимается назначение количества классов, на которые классифицируются входные (используется ИНС_K1) и выходные (используется ИНС_K2) примеры. Количество классов основной и вспомогательной ИНС совпадают. После обучения и тестирования нейронных сетей (ИНС_K1 и ИНС_K2) на обучающем и тестовом задачниках вычисляются ошибки обучения Δ_{K1} и тестирования Δ_{K2} :

$$\Delta_k = 1/m_b (\sum \Delta_{i_абс}), \quad (17)$$

где Δ_k – ошибка обучения или тестирования; m_b – количество примеров обучающей или тестовой выборки; $\Delta_{i_абс} = 0$, если ответ ИНС корректный; $\Delta_{i_абс} = 1$, если ответ ИНС ошибочный.

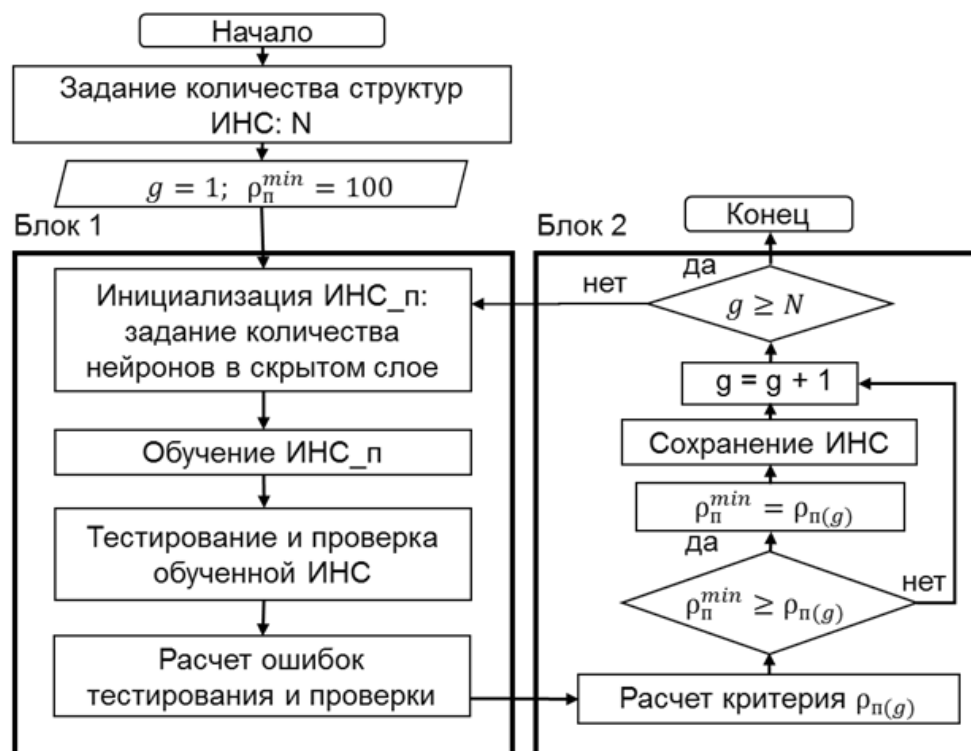


Рис. 3. Алгоритм подбора структуры многослойного персептрона
Fig. 3. Algorithm for multilayer perceptron structure selection

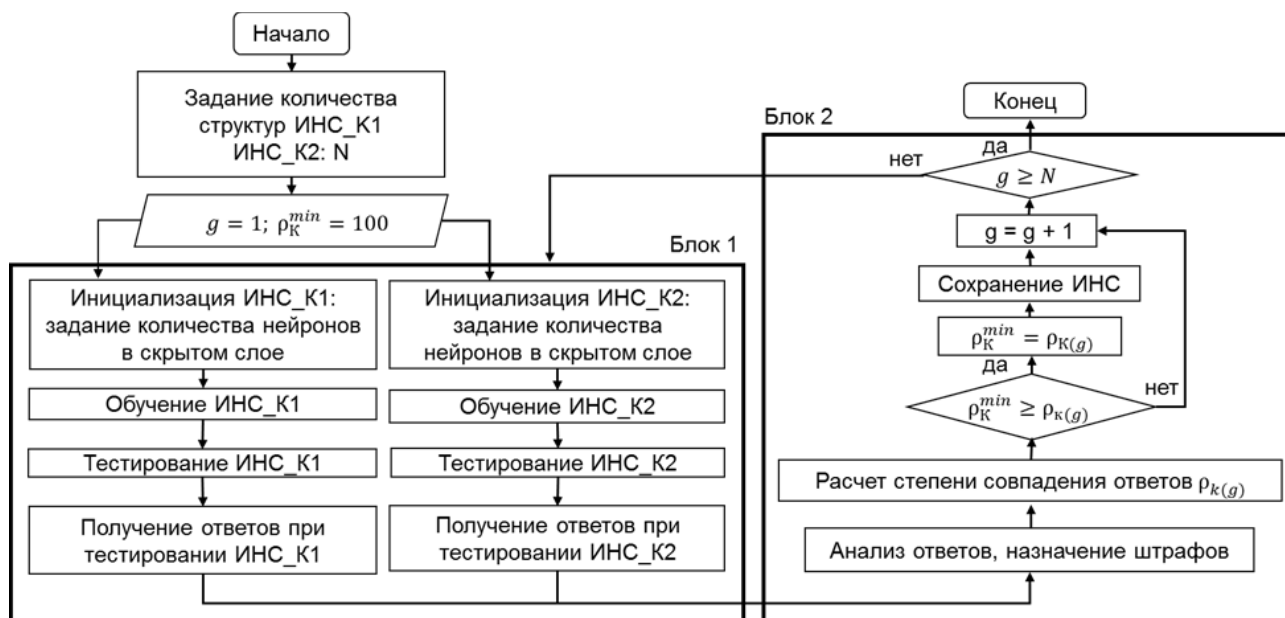


Рис. 4. Алгоритм подбора структуры сети Кохонена
 Fig. 4. Kohonen network structure selection algorithm

В блоке 2 выполняется анализ критерия на предмет выбора оптимальной структуры обеих ИНС. Структура ИНС рассматривается оптимальной в случае максимального совпадения ответов двух ИНС (ИНС_K1 и ИНС_K2). Это означает, что примеры входной выборки классифицируются нейронной сетью ИНС_K1, точно так же как примеры выходной выборки классифицируются нейронной сетью ИНС_K2.

Критерий выбора оптимальной структуры двух ИНС записывается следующим образом:

$$\rho_{K(g)} \rightarrow \min; \quad (18)$$

$$\rho_{K(g)} = \varepsilon_{k1} + \varepsilon_{k2} + \varepsilon_{k3}, \quad (19)$$

при ограничениях

$$\Delta_{K1} < \Delta_{\varepsilon1}, \quad (20)$$

$$\Delta_{K2} < \Delta_{\varepsilon2}, \quad (21)$$

где g – номер расчета; $\Delta_{\varepsilon1}$, $\Delta_{\varepsilon2}$ – точность тестирования ИНС_K1 и ИНС_K2, соответственно; ε_{k1} – штраф за наличие пустых классов при классификации примеров; ε_{k1} равно числу пустых классов; ε_{k2} – штраф за

лишние или отсутствующие примеры в классе. ε_{k2} рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{k2} = \left(\sum_{k=1}^m \left(\frac{n_{in} - n_{out}}{n_{in}} \right) \right) / m, \quad (22)$$

где n_{in} – количество входных примеров в классе; n_{out} – количество выходных примеров в классе; m – количество классов.

ε_{k3} – дисперсия ряда, которая отвечает за совпадение ответов ИНС_K1 и ИНС_K2, вычисленная по формуле:

$$\varepsilon_{k3} = \frac{1}{(v_1 + v_2)} (\sum_1^{v_1 + v_2} \sigma_{i(j)}^2); \quad (23)$$

$$\sigma_{i(j)}^2 = \sum_1^k w_l^2 - w_{cp}^2 / k - 1, \quad (24)$$

где i – номер класса при обучении ИНС_K1; j – номер класса при обучении ИНС_K2; w_l – класс, в который попал пример; w_{cp} – среднее значение номеров классов, в которые попали примеры. Дисперсии ответов количественно показывают совпадение ответов ИНС_K1 и ИНС_K2. Если дисперсия равна нулю и количество примеров совпало, то рассматриваемый класс имеет нулевую погрешность.

На каждом цикле расчета ρ_K^{min} сравнивается с предыдущим значением и если новое

значение меньше, то ИНС_K сохраняется до следующего меньшего значения ρ_K . Наименьшее значение ρ_k^{min} обеспечивает максимальное совпадение ответов ИНС_K1 и ИНС_K2, что обуславливает возможность использования выбранной структуры ИНС_K1 в реальном времени.

Результатом работы алгоритма являются обученные ИНС_K1 и ИНС_K2, структуры которых являются оптимальными среди рассмотренных структур.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание тестовой схемы и сценария. Апробация предложенного алгоритма была выполнена на 6-узловой ЭЭС (рис. 5) по сценарию: вычислить гибкость ЭЭС, функционирующих в разных режимах при одинаковых ограничениях.

В табл. 1 представлены характерные особенности каждого узла. В строке 1 расположены номера узлов, в строке 2 дано описание типа узла, в строке 3 представлена ха-

рактеристика каждого генерирующего узла, в строке 4 отмечены узлы, обеспечивающие гибкость ЭЭС, в строке 5 отмечены узлы с неопределенностью.

Формирование архивов. В предлагаемом сценарии рассматривается один набор ограничений и допускается, что результаты оценивания состояния – это параметры исследуемого УР, т.к. измерения моделируются на момент времени $t + 1$. Модель измерения записывается следующим образом:

$$\bar{y} = y_{ист} + x_{сл}\sigma_y, \quad (25)$$

где $x_{сл} \in N(0,1)$; σ_y^2 – дисперсия измерения; $y_{ист}$ – истинное значение; $x_{сл}$ – это случайная величина, полученная с помощью датчика случайных чисел.

Для моделирования архива срезов измерений требуется следующая информация:

1. Суточные графики активной и реактивной нагрузок в узлах 3, 4 (24 точки).

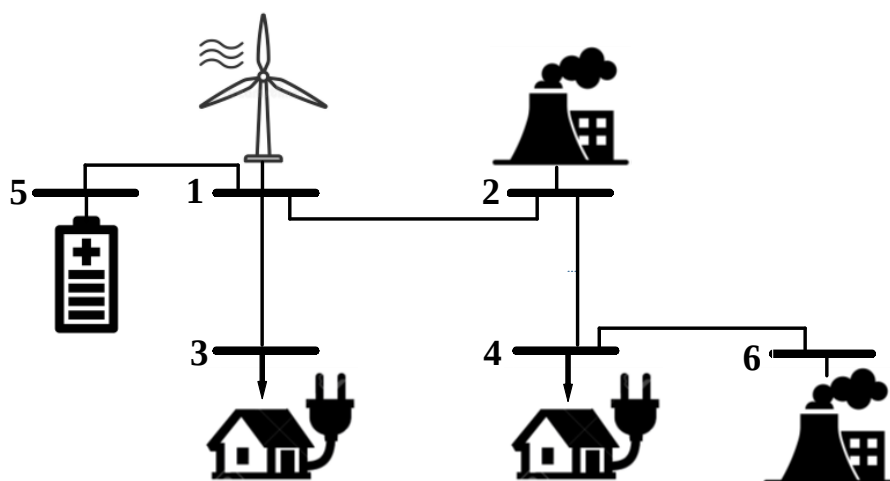


Рис. 5. Тестовая схема
Fig. 5. Test circuit

Таблица 1. Характеристики узлов
Table 1. Node characteristics

Информация об узле	Номер узла					
	1	2	3	4	5	6
1	ветровая	традиционная	нагрузка	нагрузка	батарея	традиционная
2		управляющие воздействия				балансирующая
3					+	+
4		+	+	+		+
5						

2. Суточные графики активной и реактивной генераций в узле 1 (ветровая станция). Генерация активной мощности на ветровой станции вычисляется на основе информации о скорости ветра и типовой кривой ветровой турбины. Скорость ветра моделируется по распределению Вейбула.

3. Суточный график зарядки батареи SOC (от англ. State of Charge) в узле 5. Мощность батареи вычисляется в соответствии со стратегией управления аккумуляторной батареей: максимизировать использование возобновляемой энергии ветра с помощью батареи.

4. Значения активной и реактивной мощности в узле 2.

Архивы УР и УР с минимальной гибкостью формируются в следующем порядке:

1. Вычисляется установившийся режим для каждой точки графиков генерации и нагрузки. Балансирующим узлом назначается узел 6. Результаты расчета УР рассматриваются как эталонные параметры. В модели измерения они принимаются за истинные значения $y_{ист}$.

2. Моделируется срез измерений. К истинным значениям измеряемых параметров режима $y_{ист}$ добавляются погрешности измерения $x_{сл}\sigma_y$. Для одной и той же точки УР моделируется 6 срезов. Это означает, что параметры режима измеряются каждые 10 мин.

3. Выполняется ОС по смоделированному срезу измерений. Полученный УР записывается в архив 1.

4. Вычисляется УР с минимальной гибкостью и записывается в архив 3. Для расчета УР с минимальной гибкостью могут быть применены разные методы.

Данные архива 1 (активные мощности во всех узлах в исследуемом режиме) используются для создания входных примеров, а данные архива 3 (активные мощности во всех узлах в УР с минимальной гибкостью) используются для создания выходных примеров задачника. Сформированный задачник разбивается на обучающую, проверочную и тестовую выборки. Обучающая выборка включает 70% примеров из всего задачника (94 примера), проверочная выборка состоит из 15% (20 примеров), тестовая выборка включает 15% (20 примеров).

По сформированным задачникам обучается и тестируется ИНС с парадигмой «обучение с учителем» (ИНС_п). Для обучения и тестирования ИНС с парадигмой «обучение без учителя» (ИНС_{K1}) требуются только входные данные обучающей и тестовой выборок. По выходным данным обучающего и тестового задачников обучается и тестируется ИНС_{K2}, результаты которой необходимы для интерпретации ответов ИНС_{K1}.

На рис. 6 и 7 представлены по 10 примеров входных и выходных данных сформированного задачника. Один столбец в каждой табл. соответствует одному примеру.

Входной пример задачника состоит из: $S1_{вход} = (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6)$.

Выходной пример задачника состоит из: $S1_{выход} = (P_1, P_2^{ypmin}, P_3^{ypmin}, P_4^{ypmin}, P_5, P_6^{ypmin})$.

Далее подробно описывается формирование (моделирование, обучение и тестирование) двух ИНС для использования их в режиме реального времени. Программная реализация нейронных сетей была выполнена в среде MatLab.

sxem6_in										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	P_1	28.5510	27.6610	28.1310	28.7860	27.4360	28.3470	28.4220	27.7980	28.7370
2	P_2	17.7560	19.4520	18.9910	18.3960	19.0120	18.9110	19.1720	19.8340	19.4570
3	P_3	-10.3840	-11.3640	-9.3843	-10.1320	-10.1300	-10.8560	-9.5544	-9.8457	-9.8745
4	P_4	-17.7310	-18.9120	-19.2810	-18.3910	-18.4320	-17.6230	-19.1200	-18.7920	-18.2260
5	P_5	-6.5077	-7.1738	-6.4041	-6.2323	-7.6922	1.5493	-0.9912	-0.4689	-1.6792
6	P_6	13.4830	13.0700	13.5800	13.0570	12.5090	12.7500	12.6110	12.7870	12.6780

Рис. 6. Фрагмент задачника с входными данными
Fig. 6. A fragment of the task book with input data

sxemb_out_ch										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	P_1	28.5290	27.8560	28.0500	28.7650	27.4660	27.8470	27.9600	27.5710	28.3860
2	P_2	32.6790	32.9840	32.7600	32.3100	32.9750	32	32.2520	32.7790	32.1930
3	P_3	-20.1950	-22.1420	-19.7390	-20.0710	-20.0520	-19.1030	-19.9930	-21.6810	-21.7690
4	P_4	-22.8710	-21.0220	-22.9660	-22.4020	-22.3980	-23.8730	-23.0780	-20.4940	-20.1600
5	P_5	-6.5255	-6.9811	-6.4847	-6.2510	-7.6763	1.0472	-1.4499	-0.6950	-2.0277
6	P_6	12.9790	12.8790	13.1210	12.4390	12.5830	11.7690	11.4600	12.1230	11.6650

Рис. 7. Фрагмент задачника с выходными данными
Fig. 7. A fragment of the task book with output data

Формирование окружения для многослойного персептрона. Для выбора структуры ИНС_п, обеспечивающей лучшие результаты прогнозирования УР с минимальной гибкостью, было проведено 20 экспериментов по алгоритму, представленному на рис. 3. В первом эксперименте количество нейронов в скрытом слое равно 6 и далее увеличивается до 166. В ходе вычислительного эксперимента отслеживалась динамика изменения критерия ρ_{Π} в зависимости от числа нейронов в скрытом слое ИНС_п (рис. 8). На рис. 8 сплошной линией показаны значения ρ_{Π} для каждого расчета, прямой линией обозначен предел, ниже которого располагаются значения критериев трех лучших структур.

В табл. 2 записаны значения критерия ρ_{Π} и количество нейронов в скрытом слое для выбранных структур ИНС.

В процессе эксперимента были выявлены близкие значения критерия ρ_{Π} для трех структур ИНС_п. Для уточнения полученных данных с целью окончательного выбора

структуры ИНС_п были проведены дополнительные расчеты. Под уточнением полученных данных понимается определение среднестатистического значения критерия ρ_{Π} в результате многократного обучения ИНС_п с тремя выбранными структурами. Каждая из ИНС обучалась 30 раз, после чего были вычислены среднестатистические значения средних и максимальных ошибок тестирования и проверки для каждой из трех ИНС. Результаты расчетов представлены в табл. 3. Из табл. 3 видно, что ИНС с 16 нейронами в скрытом слое имеет лучшие показатели.

Таблица 2. Значения критериев для выбранных искусственных нейронных сетей

Table 2. Criteria values for selected artificial neural networks

Место в рейтинге	Количество нейронов	ρ_{Π}
1	16	2,7014
2	6	3,9081
3	146	4,264

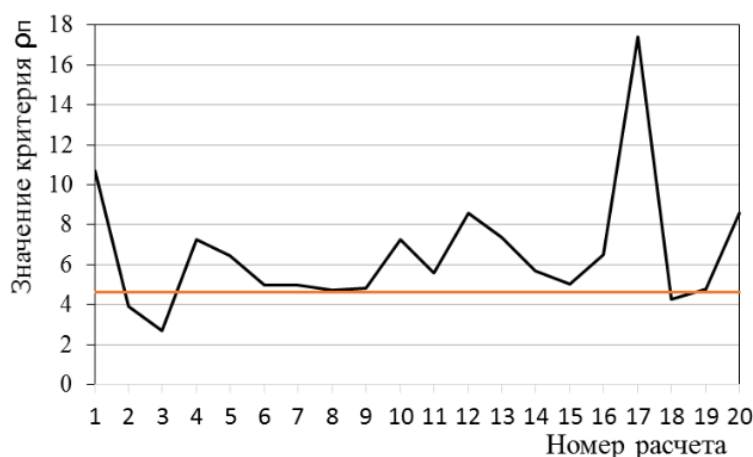


Рис. 8. Значение ρ_{Π} для каждого расчета
Fig. 8. Value of ρ_{Π} for each calculation

Таблица 3. Среднестатистические величины ошибок тестирования и проверки
Table 3. Average statistical values of testing and verification errors

Число нейронов	Средняя ошибка		Максимальная ошибка	
	тестирования	проверки	тестирования	проверки
6	0,233	0,245	1,785	1,782
16	0,216	0,271	1,676	1,766
146	0,349	0,382	2,558	2,871

Формирование окружения для искусственных нейронных сетей Кохонена.

Для выбора структуры ИНС_K1 и ИНС_K2, обеспечивающих лучшие результаты распознавания УР с минимальной гибкостью при соблюдении ограничений (20), (21), было проведено 10 экспериментов по алгоритму, представленному на рис. 4. В первом эксперименте обучались ИНС Кохонена минимального размера (3 нейрона в выходном слое), в последующих экспериментах размер ИНС постепенно увеличивался (до 12 нейронов). После каждого увеличения количества нейронов ИНС обучались заново.

По результатам экспериментов была составлена табл. 4, в которой представлены значения критерия ρ_K и величины штрафов ε_{K1} , ε_{K2} , ε_{K3} , назначенные за несовпадение ответов ИНС_K1 и ИНС_K2. В первой строке табл. 4 записан номер эксперимента, во второй строке показано число нейронов в выходном слое каждой ИНС (ИНС_K1 и ИНС_K2). В третью, четвертую, пятую строки записываются величины штрафов, назначенные за наличие пустых классов (пустые классы образуются при использовании ИНС с ко-

личеством выходных нейронов равными 11 и 12); за лишние или отсутствующие примеры в классе, за некорректную классификацию примеров. ε_{K2} , ε_{K3} вычисляется по (22) и (23), соответственно.

Из табл. 4 видно, что минимальное значение ρ_K получено при использовании ИНС с тремя нейронами в выходном слое. В табл. 5 представлены ошибки тестирования ИНС_K1 и ИНС_K2.

По представленным в табл. 5 результатам построена зависимость абсолютного значения средней ошибки тестирования от числа нейронов в выходном слое (рис. 9). Пунктирной линией показана заданная точность тестирования ($\Delta_K = 0,1$). Анализ рис. 9 показывает, что:

- наблюдается уменьшение величины ошибки с ростом количества нейронов до 9, далее средняя ошибка увеличивается;
- величина ошибки тестирования ИНС с тремя нейронами ($\Delta_{K1} = 0,104$) превышает заданную точность;
- величина ошибки тестирования ИНС с другими рассмотренными конфигурациями удовлетворяют ограничениям (20), (21).

Таблица 4. Результаты расчетов
Table 4. Calculation results

1	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Количество	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	ε_{K1}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
4	ε_{K2}	9,64	15,26	18,24	26,89	17,36	47,29	14,07	15,39	150,67	2,95
5	ε_{K3}	0,016	0,045	0,126	0,258	0,505	0,359	0,108	0,481	0,386	0,285
6	ρ_K	9,66	15,314	18,371	27,157	17,874	47,649	14,182	15,875	17,056	23,243

Таблица 5. Ошибки тестирования искусственной нейронной сети _K1 и искусственной нейронной сети _K2
Table 5. Testing errors of artificial neural networks _K1 and _K2

Количество	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Δ_{K1}	0,104	0,089	0,074	0,067	0,05	0,052	0,044	0,052	0,044	0,052
Δ_{K2}	0,097	0,082	0,082	0,044	0,059	0,052	0,029	0,022	0,037	0,044

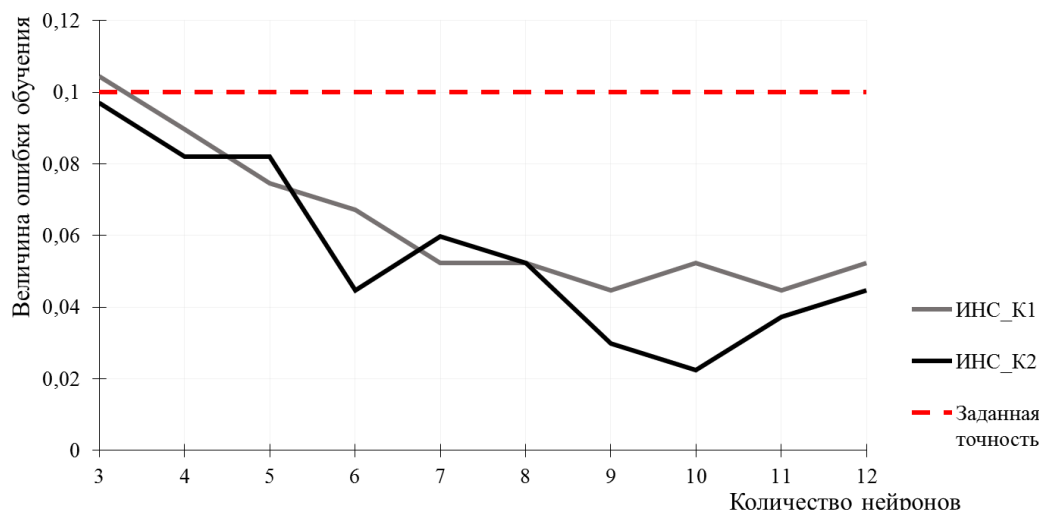


Рис. 9. Влияние числа нейронов на ошибку обучения нейронной сети
Fig. 9. Number of neurons vs value of the neural network training error

Анализ табл. 4 и рис. 9 показывает, что оптимальной структурой каждой ИНС является ИНС с 9-ю нейронами в выходном слое (расчет № 7), т.к. в этом случае выполняются ограничения, и значение ρ_K оказывается наименьшим среди оставшихся (табл. 4, строка 6). Это означает, что при использовании данной структуры обеспечивается лучшее совпадение результатов ИНС_K1 и ИНС_K2.

Для визуализации меры совпадения ответов ИНС_K1 и ИНС_K2 построены диаграммы попадания примеров в классы (рис. 10). На верхней диаграмме показано распределение входных примеров, выполненное с помощью ИНС_K1, на нижней диаграмме представлено распределение, выполненное с помощью ИНС_K2. Каждый шестиугольник является нейроном (центром класса), где цифра отражает число примеров, связанных с этим нейроном. Размер темного пятна в шестиугольнике показывает долю примеров от максимального числа примеров, принадлежащих к одному из классов (класс с максимальным количеством примеров закрашивается полностью). Стрелки указывают на соответствие ответов ИНС_K1 и ИНС_K2. Например, 23 примера были распределены с помощью ИНС_K1 в класс 4, а с помощью ИНС_K2 – в класс 8. Дисперсия ряда, который отвечает за совпадение ответов ИНС_K1 и ИНС_K2, в данном случае равна 0 (полное

совпадение). Средняя величина дисперсии рядов, отвечающих за совпадение ответов ИНС_K1 и ИНС_K2 равна 0,108, что рассматривается допустимым.

Представленные диаграммы и малые величины штрафов за некорректность ответов подтверждают возможность использования ИНС с девятью нейронами в выходном слое для расчета гибкости ЭЭС в режиме реального времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вычисление гибкости исследуемого режима с помощью разработанного алгоритма, показанного на рис. 2, в условиях реального времени выполняется в следующем порядке:

- 1) из текущего среза измерений формируется входной пример для ИНС_K1;
- 2) обученная ИНС_K1 распознает текущий режим и распределяет его к одному из классов;
- 3) по номеру класса определяется соответствующий данному классу режим с минимальной гибкостью;
- 4) вычисляются качественный и количественный показатели гибкости.

Далее показаны результаты вычисления гибкости пяти режимов тестовой схемы.

На рис. 11 представлены входные векторы, сформированные из пяти исследуемых режимов. На рис. 12 показаны ответы ИНС_K1, интерпретированные с помощью

ИНС_K2 (далее – выходные примеры). Выходные примеры представляют собой параметры УР с минимальной гибкостью, соответствующие текущим (исследуемым) режимам.

Для визуализации процесса вычисления гибкости результаты представлены в графическом виде (рис. 13). Входной пример каждого исследуемого режима состоит из шести параметров, поэтому входное пространство – шестимерное. На рис. 13 показаны три координаты шестимерного пространства: ось

абсцисс – P_1 (активная мощность в узле 1); ось ординат – P_2 (активная мощность в узле 2); ось аппликата – P_3 (активная мощность в узле 3).

На рис. 13 а точками представлены входные примеры в трехмерном пространстве, где цифра обозначает номер примера. На рис. 13 б показаны расположения входных и выходных примеров. Параметры режимов с минимальной гибкостью отображены треугольниками.

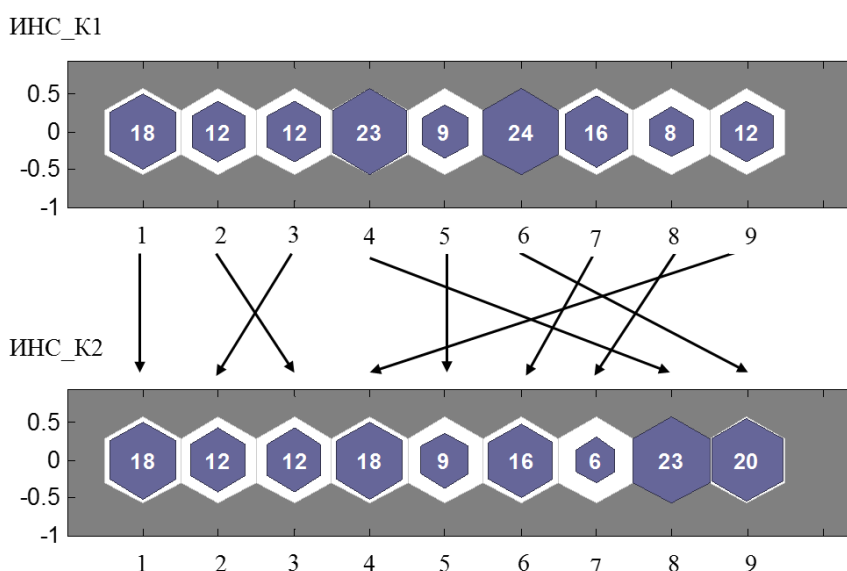


Рис. 10. Диаграммы попадания примеров в классы
Fig. 10. Diagrams of examples falling into classes

26.8998	20.2902	19.0176	23.0391	22.4553
18.9413	19.8224	18.5063	18.1164	18.5351
-10.1372	-10.0342	-14.7691	-17.3225	-16.6553
-18.5030	-16.8861	-18.7047	-17.9742	-18.2583
-7.3012	0.4049	0.4751	-5.6397	-8.0523
13.0180	11.0414	10.7697	13.0358	12.1588

Рис. 11. Входные векторы
Fig. 11. Input vectors

27.2074	21.4866	17.5542	27.5832	22.9381
34.0616	32.2865	32.1320	29.3024	21.2913
-19.1738	-22.0641	-19.4705	-22.7842	-21.4099
-22.6988	-18.6875	-23.8926	-20.0612	-18.5291
-6.6138	-0.9249	0.5867	-8.0257	-7.0973
11.6947	12.7817	11.9392	13.1392	12.7757

Рис. 12. Выходные векторы
Fig. 12. Output vectors

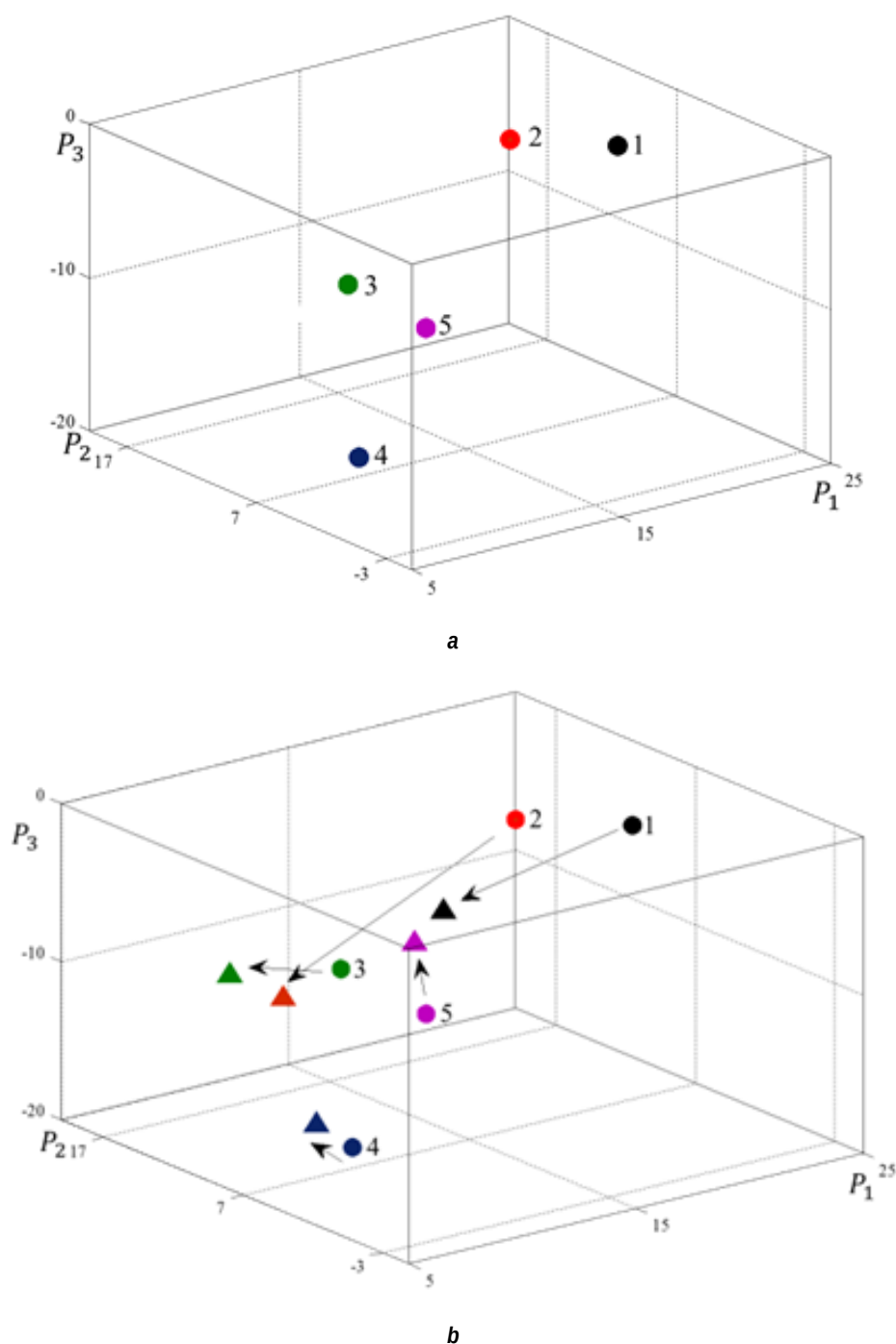


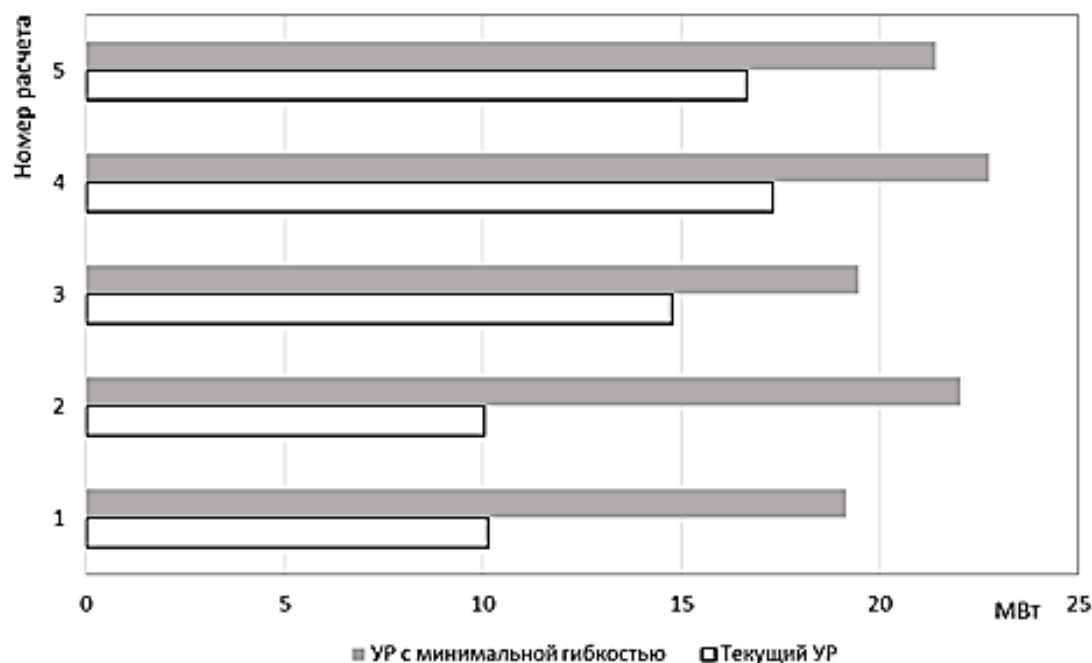
Рис. 13. Координаты входных и выходных примеров в трехмерном пространстве:
а – расположение входных примеров; б – расположение входных и выходных примеров
Fig. 13. Coordinates of input and output examples in a three-dimensional space:
a – location of input examples; b – location of input and output examples

На рис. 14 показаны активные мощности в узлах 3 (рис. 14 а) и 4 (рис. 14 б) в текущих режимах (белые столбцы) и в режимах с минимальной гибкостью (серые столбцы). Разница между величинами столбцов показывает запас гибкости.

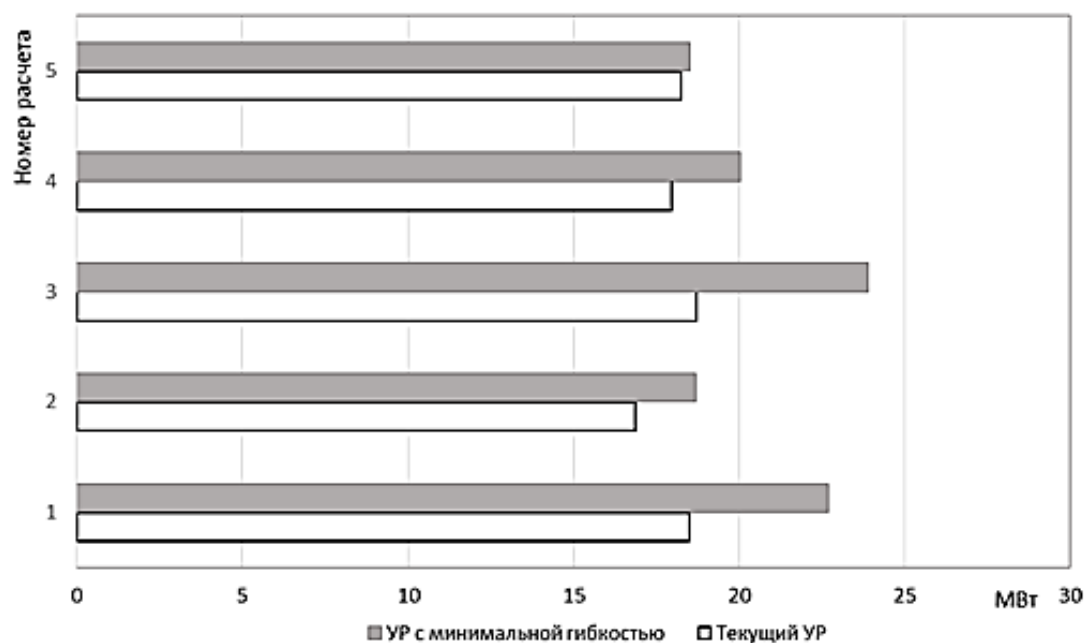
Из рис. 14 видно, что:

– во всех рассмотренных режимах ЭЭС обладает гибкостью;

– гибкость пяти исследуемых режимов равна 13,23 МВт в первом режиме, 13,83 МВт – во втором, 9,88 МВт – в третьем, 7,54 МВт – в четвертом и 5,02 МВт – в пятом режимах, соответственно.



а



б

Рис. 14. Активные мощности в текущем установившемся режиме и установившемся режиме с минимальной гибкостью: а – 3 узел; б – 4 узел

Fig. 14. Active power in the current steady-state mode and the steady-state mode with minimal flexibility: а – 3 node; б – 4 node

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана проблема, связанная с применением искусственных нейронных сетей при решении задачи определения гибкости ЭЭС в режиме реального времени. Про-

веденный обзор статей, выполненный по данной тематике, позволяет сказать, что проблема определения гибкости ЭЭС является новой важной задачей среди задач, обеспечивающих надежное и эффективное

управление ЭЭС. Для определения гибкости ЭЭС с возобновляемыми источниками энергии, которые обладают стохастическими характеристиками, необходимы методы, позволяющие учитывать реальные условия работы данных систем. Выполнение этого требования возможно за счет применения ИНС.

Разработан алгоритм для анализа результатов двух типов ИНС с разными структурами (многослойный персептрон и ИНС Кохонена). Смоделировано множество структур ИНС каждого типа с целью формирования ИНС, обеспечивающих максимальную способность к обобщению. Разработан алгоритм выбора оптимальных структур ИНС в соответствии с критерием максимальной достоверности ответов при распознавании УР с минимальной гибкостью. ИНС с оптимальной структурой рекомендуется к применению в режиме реального времени при определении гибкости ЭЭС.

Предложен оригинальный способ интерпретации ответов ИНС Кохонена, для которого требуются ответы другой ИНС Кохонена. Для корректной интерпретации ответов ИНС_K1 проводится предварительное исследование по выбору структур двух ИНС (ИНС_K1, ИНС_K2). Показано, что при определенных структурах ИНС_K1, ИНС_K2 отве-

ты ИНС_K1 интерпретируются правильно.

В результате множества экспериментов сформированы окружения искусственных нейронных сетей для прогнозирования и распознавания УР с минимальной гибкостью 6-узловой схемы. Анализ среднестатистических средних и максимальных ошибок тестирования и проверки многослойного персептрона показывает, что ИНС с 16-ю нейронами в скрытом слое является оптимальной для определения УР с минимальной гибкостью в режиме реального времени. Анализ критерия оптимальности при выборе ИНС Кохонена показывает, что структура ИНС с девятью выходными нейронами является оптимальной для определения УР с минимальной гибкостью в режиме реального времени.

Выполнены расчеты гибкости пяти режимов тестовой схемы. Анализ результатов показал, что величина гибкости разная в различных режимах, что подтверждает необходимость определения гибкости ЭЭС в режиме реального времени.

Применение разработанных алгоритмов позволит осуществлять мониторинг гибкости ЭЭС в режиме реального времени с целью повышения качества оперативного управления режимами ЭЭС и более полного использования ресурсов ЭЭС.

Список источников

1. Mohandes B., Moursi M. S. E., Hatziaargyriou N., Khatib S. E. A review of power system flexibility with high penetration of renewables // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34. Iss. 4. P. 3140–3155. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2897727>.
2. Rebours Y., Kirschen D. S., Trotignon M., Rossignol S. A survey of frequency and voltage control ancillary services – Part I: Technical features // IEEE Transactions on Power Systems. 2007. Vol. 22. Iss. 1. P. 350–357. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888963>.
3. Terras J. M., Catia S., Zita V., Faria P. Consumers modelling and clustering for the use of flexibility to mitigate network congestion // Proceedings Journal. 2020. Vol. 2020. Iss. 1. P. 364–367. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0059>.
4. Сидорович В., Бокарев Б., Чаусов И., Кулешов М., Рычков С., Бурдин И. Управление спросом в электроэнергетике России: открывающиеся возможности. Экспертно-аналитический доклад // Инфраструктурный центр EnergyNet. Москва, 2019. [Электронный ресурс]. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/publication/EnergyNet_2019.pdf (12.03.2021).
5. Bell K. R. W., Nedic D. P., Martin L. A. S. S. The need for interconnection reserve in a system with wind generation // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2012. Vol. 3. Iss. 4. P. 703–712. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2208989>.
6. Chicco G., Riaz S., Mazza A., Mancarella P. Flexibility from distributed multienergy systems // Proceedings of the IEEE. 2020. Vol. 108. Iss. 9. P. 1496–1517. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2986378>.
7. Klyapovskiy S., You Shi, Michiorri A., Kariniotakis G., Bindner H.W. Incorporating flexibility options into distribution grid reinforcement planning: a techno-economic framework approach // Applied Energy. 2019. Vol. 254. P. 113662. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113662>.
8. Krč R., Kratochvilova M., Podroužek J., Apeltauer T., Stupka V., Pitner T. Machine learning-based node characterization for smart grid demand response flexibility assessment // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 5. P. 2954. <https://doi.org/10.3390/su13052954>.
9. Förderer K., Ahrens M., Bao Kaibin, Mauser I., Schmeck H. Towards the modeling of flexibility using artificial neural networks in energy management and smart grids: note // e-Energy '18: Proceedings of the Ninth Inter-

national Conference on Future Energy Systems (Karlsruhe, 12–15 June 2018). Karlsruhe, 2018. P. 85–90. <https://doi.org/10.1145/3208903.3208915>.

10. Förderer K., Ahrens M., Bao Kaibin, Mauser I., Schmeck H. Modeling flexibility using artificial neural networks // *Proceedings of the 7th DACH + Conference on Energy Informatics*. 2018. Vol. 21. P. 73–91. <https://doi.org/10.1186/s42162-018-0024-4>.

11. Hammami Z., Mouchaweh M. S., Mouelhi W., Said L. B. Discussion and review of the use of neural networks to improve the flexibility of smart grids in presence of distributed renewable resources // *17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications* (Orlando, 17–20 December 2018). Orlando: IEEE, 2018. P. 1304–1309. <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00211>.

12. MacDougall P., Kosek A. M., Bindner H., Deconinck G. Applying machine learning techniques for forecasting flexibility of virtual power plants // *IEEE Electrical Power and Energy Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2016.7771738>.

13. Maruf M. N. I., Munoz L. A. H., Nguyen P. H., Ferreira H. M. L., Kling W. L. An enhancement of agent-based power supply-demand matching by using ANN-based forecaster // *4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*. 2013. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695257>.

14. Coccia G., Mugnini A., Polonara F., Arteconi A. Artificial-neural-network-based model predictive control to exploit energy flexibility in multi-energy systems comprising district cooling // *Energy*. 2021. Vol. 222. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119958>.

15. Baboli P. T., Babazadeh D., Bowatte D. R. K. Measurement-based modeling of smart grid dynamics: a digital twin approach // *10th Smart Grid Conference*. 2020. <https://doi.org/10.1109/SGC52076.2020.9335750>.

16. Глазунова А. М., Аксаева Е. С. Оценка гибкости электроэнергетической системы с ветровыми станциями и накопителями энергии в режиме реального времени // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2021. № 3. С. 24–31.

17. Glazunova A., Aksaeva E., Semshikov E., Negnevitsky M. Determining the flexibility of power systems with high share of wind generation using artificial neural networks // *31st Australasian Universities Power Engineering Conference*. 2021. <https://doi.org/10.1109/AUPEC52110.2021.9597838>.

18. Аксаева Е. С., Глазунова А. М. Использование искусственных нейронных сетей при определении гибкости электроэнергетической системы // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Надежность систем энергетики в условиях их цифровизации: 93-е заседание семинара (г. Волжский, 13–17 сентября 2021 г.)*. Волжский, 2021. С. 272–282.

19. Пархоменко С. С., Леденева Т. М. Обучение нейронных сетей методом Левенберга–Марквардта в условиях большого количества данных // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2014. № 2. С. 98–106.

20. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / пер. 3-го англ. изд. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. 655 с.

References

1. Mohandes B., Moursi M. S. E., Hatziairgyriou N., Khatib S. E. A review of power system flexibility with high penetration of renewables. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(4):3140–3155. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2897727>.

2. Rebours Y., Kirschen D. S., Trotignon M., Rossignol S. A survey of frequency and voltage control ancillary services – Part I: Technical features. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007;22(1):350–357. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888963>.

3. Terras J. M., Catia S., Zita V., Faria P. Consumers modelling and clustering for the use of flexibility to mitigate network congestion. *Proceedings Journal*. 2020;2020(1):364–367. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0059>.

4. Sidorovich V., Bokarev B., Chaousov I., Kuleshov M., Rychkov S., Burdin I. Demand management in the Russian energy sector: emerging opportunities. Expert-analytical report. *EnergyNet*. 2019. Available from: https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/publication/EnergyNet_2019.pdf [Accessed 12th March 2021]. (In Russ.).

5. Bell K. R. W., Nedic D. P., Martin L. A. S. S. The need for interconnection reserve in a system with wind generation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2012;3(4):703–712. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2208989>.

6. Chicco G., Riaz S., Mazza A., Mancarella P. Flexibility from distributed multienergy systems. In:

Proceedings of the IEEE. 2020;108(9):1496–1517. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2986378>.

7. Klyapovskiy S., You Shi, Michiorri A., Kariniotakis G., Bindner H. W. Incorporating flexibility options into distribution grid reinforcement planning: a techno-economic framework approach. *Applied Energy*. 2019;254:113662. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113662>.

8. Krč R., Kratochvilova M., Podroužek J., Apeltauer T., Stupka V., Pitner T. Machine learning-based node characterization for smart grid demand response flexibility assessment. *Sustainability*. 2021;13(5):2954. <https://doi.org/10.3390/su13052954>.

9. Förderer K., Ahrens M., Bao Kaibin, Mauser I., Schmeck H. Towards the modeling of flexibility using artificial neural networks in energy management and smart grids: note. In: *e-Energy '18: Proceedings of the Ninth International Conference on Future Energy Systems*. 12–15 June 2018, Karlsruhe. Karlsruhe, 2018, p. 85–90. <https://doi.org/10.1145/3208903.3208915>.

10. Förderer K., Ahrens M., Bao Kaibin, Mauser I., Schmeck H. Modeling flexibility using artificial neural networks. In: *Proceedings of the 7th DACH + Conference on Energy Informatics*. 2018;21:73–91. <https://doi.org/10.1186/s42162-018-0024-4>.

11. Hammami Z., Mouchaweh M. S., Mouelhi W., Said L. B. Discussion and review of the use of neural networks to improve the flexibility of smart grids in presence of distributed renewable resources. In: *17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications*. 17–20

December 2018, Orlando. Orlando: IEEE; 2018, p. 1304–1309. <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00211>.

12. MacDougall P., Kosek A. M., Bindner H., Deconinck G. Applying machine learning techniques for forecasting flexibility of virtual power plants. In: *IEEE Electrical Power and Energy Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2016.7771738>.

13. Maruf M. N. I., Munoz L. A. H., Nguyen P. H., Ferreira H. M. L., Kling W. L. An enhancement of agent-based power supply-demand matching by using ANN-based forecaster. In: *4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*. 2013. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695257>.

14. Coccia G., Mugnini A., Polonara F., Arteconi A. Artificial-neural-network-based model predictive control to exploit energy flexibility in multi-energy systems comprising district cooling. *Energy*. 2021;222. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119958>.

15. Baboli P. T., Babazadeh D., Bowatte D. R. K. Measurement-based modeling of smart grid dynamics: a digital twin approach. In: *10th Smart Grid Conference*. 2020. <https://doi.org/10.1109/SGC52076.2020.9335750>.

16. Glazunova A. M., Aksaeva E. S. Online estimation of flexibility of a power system that contains wind stations and energy storage units. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2021;3:24–31. (In Russ.).

17. Glazunova A., Aksaeva E., Semshikov E., Negnevitsky M. Determining the flexibility of power systems with high share of wind generation using artificial neural networks. In: *31st Australasian Universities Power Engineering Conference*. 2021. <https://doi.org/10.1109/AUPEC52110.2021.9597838>.

18. Aksaeva E. S., Glazunova A. M. The use of artificial neural networks under determination of electric power system flexibility. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki. Nadezhnost' sistem energetiki v usloviyah ih cifrovizatsii: 93-e zasedanie seminara = Methodological issues of research of the reliability of large energy systems. Reliability of energy systems in terms of digitalization: 93rd meeting of the seminar*. 13–17 September 2021, Volzhskij. Volzhskij; 2021, p. 272–282. (In Russ.).

19. Parkhomenko S. S., Ledeneva T. M. Training of neural networks by the Levenberg–Marquardt method in conditions of a large amount of data. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informacionnye tehnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies*. 2014;2:98–106.

20. Kohonen T. Self-organizing maps, 2008, 655 p. (Russ. ed.: *Samoorganizuyushchiesya karty*. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy; 2008, 655 p.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аксаева Елена Сергеевна,
кандидат технических наук,
научный сотрудник Отдела
электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Глазунова Анна Михайловна,
доктор технических наук, доцент,
старший научный сотрудник Отдела
электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики им. Л.А.
Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.01.2022; одобрена после рецензирования 21.03.2022; принята к публикации 01.06.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena S. Aksaeva,
Cand. Sci. (Eng.),
Researcher the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Anna M. Glazunova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Department
of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 18.01.2022; approved after reviewing 21.03.2022; accepted for publication 01.06.2022.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 551.55:551.556.3

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>

Повышение эффективности ветровых электростанций

Фуад Алхадж Хассан^{1✉}, Шариф Алали², Лейсан Раисовна Гайнуллина³^{1,3}Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия²Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия¹fouadhajj Hassan42@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4851-425X>²alali.charif.1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8894-4257>³gainullina7819@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5414-7647>

Резюме. Цель – оценка некоторых переменных, влияющих на параметры ветра, с целью уменьшения турбулентности и следа в максимально возможной степени; оценка положения каждой ветровой турбины и исследование пределов ветровых турбин для определения оптимального расстояния между ними. Объектом исследования явилась ветроэлектростанция мощностью 150 МВт с использованием 60 ветровых турбин. Измерения скорости и направления ветра проводились с помощью ветроизмерительного комплекса. Оптимальный формат ветровой электростанции был вычислен с использованием программного обеспечения WindFarmer от компании «DNV GL» (Норвегия). Проведенный анализ площадки на юго-востоке Республики Татарстан показал хорошее месторасположение площадки под строительство ветроэлектростанции: близкое расположение электрических сетей, отсутствие больших построек и леса. По результатам проведенной оценки сдвига ветра на разных высотах (на уровнях установки анемометров) его показатель составил 0,2. При выборе ветровых турбин для проектируемой ветроэлектростанции были рассчитаны коэффициенты мощности, которые составили, соответственно: 47% – для Siemens Gamesa SG 3.4-132 3.465MW, 45% – для Vestas V126-3.45 HTq и 29% – для Lagerwey L100-2.5 MW. По результатам исследования влияния основных факторов (рельефа местности, средней скорости ветра в исследуемом районе, расстояние до электрических сетей и др.) на выбор площадки под строительство ветроэлектростанции, а также расчету среднего сдвига ветра равного 0,2, было установлено, что условия площадки являются оптимальными для рассматриваемого района. Согласно рассчитанным значениям коэффициента использования мощности, показано, что самое его низкое значение имеет турбина Lagerwey L100 – 2,5 МВт, а у Siemens Gamesa SG 3,4-132 самый высокий коэффициент – 3,465 МВт. С экономической точки зрения высокое значение коэффициента значения мощности не всегда целесообразно, поскольку с повышением мощности турбины растет и ее стоимость.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветряная электростанция, сдвиг ветра, конфигурация турбин, компоновка турбин, коэффициент мощности

Для цитирования: Алхадж Хассан Ф., Алали Ш., Гайнуллина Л. Р. Повышение эффективности ветровых электростанций // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 217–227. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Increasing the efficiency of wind farms

Fouad Alhajj Hassan^{1✉}, Charif Alali², Leysan R. Gainullina³^{1,3}Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia²Kazan Federal University, Kazan, Russia¹fouadhajj Hassan42@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4851-425X>²alali.charif.1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8894-4257>³gainullina7819@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5414-7647>

Abstract. This work evaluates variables affecting wind parameters in order to maximally reduce turbulence and trace. In addition, the position of each wind turbine in a farm and the limits of wind turbines are determined in order to

determine an optimal distance between them. To this end, a 150 MW wind farm operating 60 wind turbines was studied. The speed and direction of wind was studied using a wind-measuring installation. An optimal mode of operating a wind farm was calculated using the WindFarmer software produced by DNV GL (Norway). Experiments conducted on a site in the south-east of the Republic of Tatarstan showed its suitability for the construction of a wind power plant: the proximity of electrical networks and the absence of large buildings and forests. The wind shear at different heights (at the levels of anemometers) was found to be 0.2. Wind turbines were selected based on a calculation of power factors, which comprised 47% for Siemens Gamesa SG 3.4-132 3.465MW, 45% for Vestas V126-3.45 HTq and 29% for Lagerwey L100-2.5 MW. The conducted analysis of the main external factors (ground profile, average wind speed, distance to electrical networks, etc.) affecting the selection of an optimal site for a wind power plant, as well as the calculation of an average wind shear of 0.2, confirmed the suitability of the site under study. According to the calculated capacity factor, Lagerwey L100 and Siemens Gamesa SG 3.4-132 turbines showed the lowest (2.5 MW) and highest (3.465 MW) values, respectively. However, from an economic point of view, a balance between the turbine's capacity factor and its cost should be achieved.

Keywords: renewable energy sources, wind farm, wind shear, turbine configuration, turbine layout, power factor

For citation: Alhajj Hassan F., Alali Ch., Gainullina L. R. Increasing the efficiency of wind farms. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):217-227. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы мировая энергетика столкнулась с дилеммой: спрос на электрическую энергию продолжает расти большими темпами, однако глобальные экологические проблемы приводят к необходимости сокращения выбросов от тепловых и атомных электрических станций. Решение данной проблемы нашлось в использовании возобновляемых источников энергии, в частности энергии ветра. Благодаря государственной политике, стимулирующей использование ветроэнергетики, а также существенному прогрессу технологии производства ветроустановок, наблюдается увеличение спроса на ветровые электростанции.

Для успешной конкуренции на энергетическом рынке системы на основе ветровых турбин должны обеспечивать наиболее эффективную работу в условиях окружающей среды. В этой связи до момента начала строительства ВЭС (ветровой электростанции) необходимыми этапами являются выбор площадки, оценка ветровых ресурсов и возможности подключения к сетям. Выбор ветровых турбин и их рациональное расположение в зависимости от окружающей среды позволит повысить мощность турбин и ВЭС в целом.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования – оценка некоторых переменных, влияющих на параметры ветра, с задачей уменьшения турбулентности и следа в максимально возможной степени; оценка положения каждой ветровой турбины

и исследование пределов ветровых турбин для определения оптимального расстояния между ними.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для строительства ветровой электростанции мощностью 150 МВт с использованием 60 ветровых турбин был проведен анализ площадки на юго-востоке Республики Татарстан. При выборе участка для строительства ветровой электростанции были соблюдены следующие условия: во-первых, площадка должна находиться вдали от любого населенного пункта, чтобы избежать шумовых воздействий; во-вторых, не должно быть высоких зданий, чтобы избежать турбулентности; в-третьих, небольшое расстояние до электрических сетей.

Доступ к локации. Экстремальные погодные условия могут помешать доступу к более удаленным объектам, что может повлиять на обслуживание установок. Это может быть зона, подверженная серьезным снежным заносам в зимний период. Получение энергии будет зависеть от эксплуатации установки и ее технического обслуживания [1, 2].

Расстояние до электрических сетей. Электрические сети проходят на близком от ветровой электростанции расстоянии. Существующая поблизости электрическая подстанция позволяет снизить стоимость кабелей и снимает вопрос об аккумулировании электрической энергии, что, соответственно, скажется на итоговой стоимости последней [3].

Влияние лесного массива на поток ветра. Там, где присутствуют препятствия потоку, например, деревья в непосредственной близости от столба или турбины, очень важно учитывать влияние этих препятствий на модель ветрового потока. Поэтому была принята методология [4, 5], в которой устанавливается взаимосвязь между местной скоростью ветра (рядом с лесным массивом) и скоростью ветра, измеренной вне зоны влияния лесного массива, а также учитываются как площадь, так и высота деревьев зоны лесного хозяйства и растительного покрова.

Для каждой турбины оценивается реальное снижение расчетной высоты ступицы, чтобы понять, как деревья препятствуют ветровому потоку. Определение этих высот зависит от высоты смещения деревьев, близости столба или турбины к деревьям и повторяемости события при соответствующих направлениях ветра.

Там, где это возможно, определяется характерный профиль коэффициента потерь энергии, чтобы представить любые изменения в лесном хозяйстве (из-за ожидаемого расширения деревьев или вырубки) в течение первых десяти лет деятельности ветровой электростанции [6].

Для ветровых электростанций, которые находятся внутри или рядом с лесным хозяйством или зонами деревьев, должно быть рассмотрено влияние того, как расположение или рост деревьев могут измениться через некоторое время, и влияние, которое это (расположение или рост деревьев) окажет на поток ветра над участком, и, таким образом, выработку энергии ветровой электростанцией. Эффект будущей вырубки деревьев, если

он известен, также может нуждаться в исследовании. Эта потеря обычно определяется исходя из визуального осмотра локации [7].

Резкая смена скорости и/или направления ветра (сдвиг ветра) на небольших расстояниях обусловлена наличием многоэтажных строений, гор, лесных массивов и т.п.

К северо-западу от участка находится небольшая посадка. Высота деревьев составляет 8–12 м, постройки отсутствуют.

Для оценки сдвига ветра можно использовать следующее уравнение [8]:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)}, \quad (1)$$

где α – сдвиг ветра; h_1 – нижний уровень измерения; h_2 – верхний уровень измерения; v_1 – скорость на нижнем уровне; v_2 – скорость на верхнем уровне [9].

С другой стороны, когда доступен обзор площадки, сдвиг ветра можно оценить в соответствии с табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из табл. 1 определяем согласно описанию площадки, что сдвиг ветра можно оценить как $\alpha = 0,2$. В соответствии с описанием площадки, биом (совокупность экосистем одной природно-климатической зоны) вокруг мачты относительно гладкий, поэтому коэффициент сдвига α относительно невелик, что указывает на незначительные колебания ветра [9, 10].

Таблица 1. Значения сдвига ветра α в соответствии с описанием местности
Table 1. Wind shear values α according to the topography notes

Описание местности	Показатель сдвига ветра, α
Ровный, твердый грунт, озеро или океан	0,1
Низкая трава на необработанном грунте	0,14
Ровная местность с травой высотой в 3 см, иногда с деревьями	0,16
Высокое здание, изгородь, несколько деревьев	0,2
Много деревьев и случайных строений	0,22–0,24
Небольшие поселения и пригород	0,28–0,3
Городские районы с высотными домами	0,4

⁴Глобальный атлас ветров [Электронный ресурс]. URL: <https://globalsolaratlas.info/map> (15.06.2021).

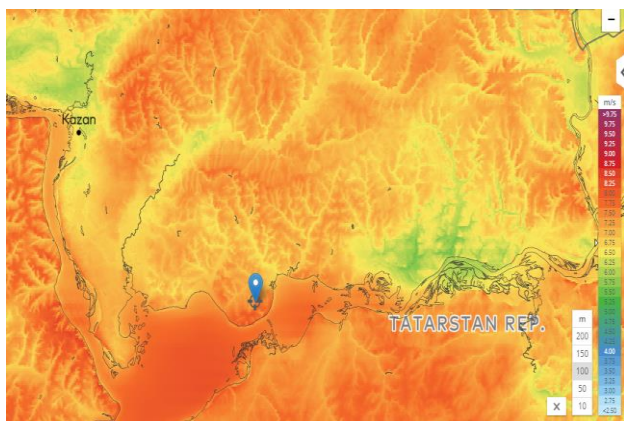


Рис. 1. Карта средней скорости ветра в юго-восточной части Татарстана

Fig. 1. Map of the average wind speed in the southeastern part of Tatarstan

При изучении характеристик ветра в исследуемом районе следует учитывать уже имеющиеся данные. На рис. 1. показана приблизительная средняя скорость ветра в исследуемом районе и прилегающих к нему территорий согласно Атласу⁴.

Как видно из рис. 1, скорость ветра в указанном районе значительно выше по сравнению с другими районами в его границах. Скорость ветра на площадке составила от 7,25 до 8,0 м/с, что позволяет отнести ее ко 2 классу согласно международным стандартам ИЕС⁵. Однако для строительства ветровой электростанции необходимы дополнительные исследования. Для этого на участке была установлена мачта для записи скорости ветра с июля 2018 г. по июль 2019 г. для оценки выработки энергии.

На рис. 2 показана мачта с датчиками с видом на запад-юго-запад и юг от мачты.

Датчики (анемометры и флюгеры) установлены на разных высотах: анемометры установлены на высотах 99 м, 94,3 м, 72,6 м. В течение года с датчиков снимались показания скорости и направления ветра [11–13].

Используя данные анемометров в уравнении сдвига (1) можно точно рассчитать сдвиг ветра α .

Уравнение сдвига ветра (1) должно быть

заполнено соответствующими данными, где h_1 – высота нижнего анемометра 94,3 м; h_2 – высота верхнего анемометра 99 м; v_1 – скорость при h_1 ; v_2 – скорость при h_2 .

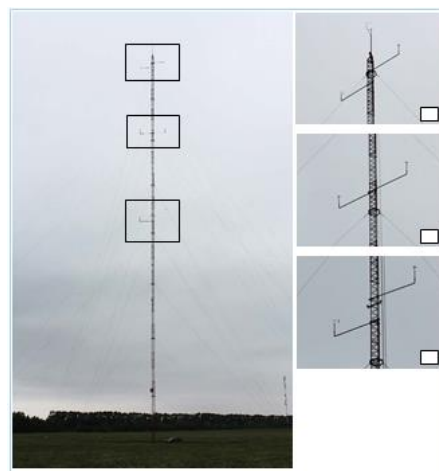


Рис. 2. Фотографии с запада-юго-запада и юга от мачты

Fig. 3. Images from the west-southwest and south of the mast

Далее расчет проводим для анемометров на высотах 72,6 м и 94,3 м.

Затем вычисляется средний сдвиг ветра путем усреднения обоих сдвигов [14].

Графики сдвигов ветра, рассчитанных по измеренным показателям, приведены на рис. 3.

Синяя линия представляет собой средний сдвиг ветра между максимальным и минимальным значениями α .

Среднее значение рассчитывается для максимального устранения неопределенности.

ВЫБОР ВЕТРОВЫХ ТУРБИН И ИХ КОМПОНОВКИ

Правильное расположение ветрогенераторов и вспомогательного оборудования является необходимым условием для достижения максимальной мощности, минимизации потерь и обеспечения безопасности ветропарка⁶ [15, 16].

⁵International standard IEC 61400-2. 2006. [Электронный ресурс]. URL: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61400-2%7Bed2.0%7Den_d.pdf (10.07.2021).

⁶Правильное расположение ветрогенератора // Helios House [Электронный ресурс]. URL: <https://www.helios-house.ru/pravilnoe-raspolzhenie-vetrogeneratora.html> (15.04.2021).



Рис. 3. Графики максимального, минимального и среднемесячного сдвигов ветра
 Fig. 3. Graphs of maximum, minimum and average monthly wind shear

Таблица 2. Параметры предлагаемых моделей турбин
 Table 2. Parameters of the proposed turbine models

Турбина	Номинальная мощность, МВт	Высота ступицы, м	Плотность воздуха, кг/м ³	Диапазон рабочих температур, °C
Siemens Gamesa SG 3,4-132 3,465 МВт	3,465	97	1,24	-20 ... +40
Vestas V126-3,45 МВт НТq	3,45	87	1,25	-20 ... +45
Lagerwey L100-2,5 МВт	2,52	99	1,225	-30 ... +30

В табл. 2 представлены модели турбин для данного проекта [17].

Формат ветровой электростанции был структурирован с целью максимального увеличения выработки энергии. Была выбрана единая компоновка ветровой электростанции для турбины Siemens Gamesa SG 3.4-132 мощностью 3,465 МВт, поскольку данная турбина имеет самый большой диаметр ротора из рассматриваемых турбин. Для сравнительного анализа с двумя другими турбинами была использована та же компоновка.

Оптимальный формат ветровой электростанции был вычислен с использованием программного обеспечения WindFarmer от DNV GL.

Для оптимизации формата были использованы сопутствующие ограничения для турбины Siemens Gamesa SG 3.4-132 3.465 МВт [18]:

1) при преобладающих направлениях ветра расстояние между турбинами должно быть в 6 раз больше диаметра ротора турбины;

2) при непреобладающих направлениях ветра расстояние между турбинами должно быть в 4 раза больше диаметра ротора турбины;

3) эллиптическое ограничение используется на основе вышеуказанных критериев;

4) уклон местности ниже 10°;

5) отступное расстояние 300 м от границы площадки;

6) дальнейшие расстояния понижения (следующие территориальные ограничения):

- 50 м от грунтовых внутренних дорог и 200 м от основных дорог;
- 100 м от акватории;
- 200 м от высоковольтных линий;
- 300 м от лесничества.

Карта участка с указанием исключенных зон и разрешенных площадей для размещения ветровых турбин представлена на рис. 4.

Часть турбинных площадок располагается в ближней зоне деревьев высотой до 12 м. Высота этих деревьев значительно меньше предлагаемой высоты ступицы, и вероятность повышенной турбулентности мала.

КОНФИГУРАЦИИ ТУРБИН

Следующая компоновка была спроектирована с учетом 60 мест размещения турбин (табл. 3) [19].

Мощность, выдаваемая ветровой турбиной, представлена кривой мощности, на которой устанавливается связь между скоростью ветра и производимой мощностью.

Каждая ветровая турбина имеет свою собственную конфигурацию, которая представляет мощность, достигаемую при заданных скоростях ветра. Готовность турбин предполагается 100% (без потерь из-за простоев, обледенения, потерь трансформатора, эффектов парковки и т. д.).

Взаимосвязь между скоростью ветра и мощностью определяется кривой мощности, которая уникальна для каждой модели турбины [20].

Графики на рис. 5–7 иллюстрируют кривую мощности ветровых турбин Siemens Gamesa SG3.4-132, 3.465MW, Vestas V126-3.45 HTq и Vestas V126-3.45 HTq, соответственно.



Рис. 4. Исключенные зоны и разрешенная территория для размещения ветровых турбин на территории ветровой электростанции:

метеорологическая мачта; — граница участка; [шaded box] зона отчуждения
Fig. 4. Excluded zones and the territory allowed for wind turbine placement on the territory of a wind farm:

meteorological mast; — site border; [shaded box] exclusion zone

Таблица 3. Конфигурации компоновки турбины
Table 3. Turbine layout configurations

Идентификатор конфигурации	Тип турбины	Высота ступицы, м	Количество турбин	Номинальная мощность, МВт
1	Siemens Gamesa SG 3.4-132 3.465 MW	97	60	207,9
2	Vestas V126-3.45 MW HTq	87	60	207
3	Lagerwey L100-2.5 MW	99	60	150

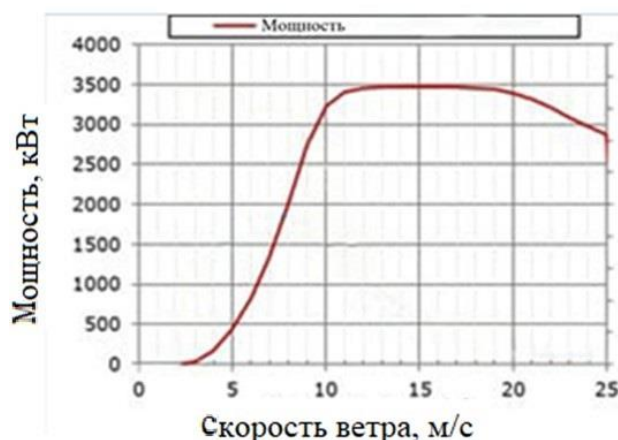


Рис. 5. График кривой мощности турбины Siemens Gamesa SG3.4-132, 3,465 МВт
Fig. 5. Graph of the Siemens Gamesa SG3.4-132 turbine power curve, 3,465 MW



Рис. 6. График кривой мощности турбины Vestas V126-3.45 HTQ
Fig. 6. Graph of the Vestas V126-3.45 HTQ turbine power curve

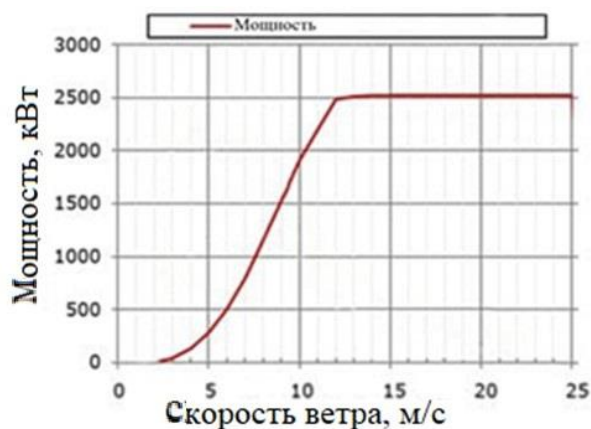


Рис. 7. График кривой мощности турбины Lagerwey L100-2.5
Fig. 7. Graph of the Lagerwey L100-2.5 turbine power curve

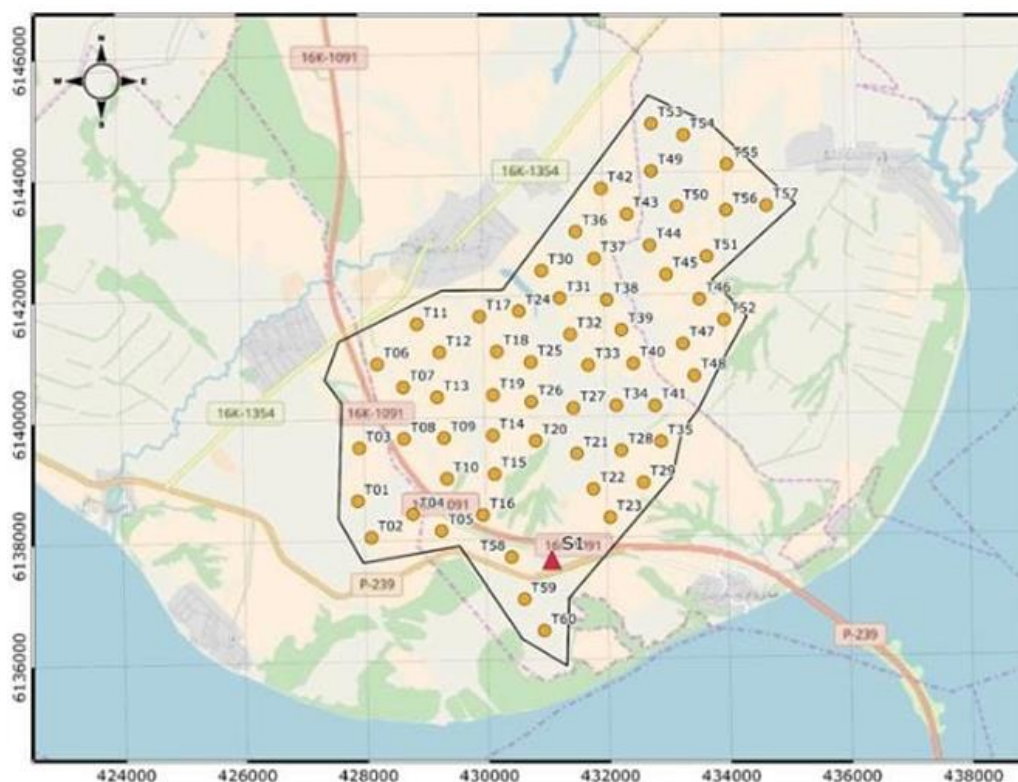


Рис. 8. Карта ветропарка с указанием расположения мачты и проектируемой компоновки турбин:
метеорологическая мачта; — граница участка; ● турбины

Fig. 8. Map of the windpark with indicated location of the mast and designed layout of turbines:
meteorological mast; — site border; ● turbines

Карта участка, показывающая проектируемую компоновку турбин и место измерения ветра, представлена на рис. 8.

КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

Используя уравнение коэффициента мощности (2), можно определить наиболее подходящую турбину:

$$CF = \frac{E_{actual}}{E_{ideal}}, \quad (2)$$

где E_{actual} – это реальная мощность (фактическая), вырабатываемая турбиной при определенных данных; E_{ideal} – максимальная мощность (идеальная), которая может быть выработана турбиной.

Фактическая энергия рассчитывается путем умножения фактической скорости ветра на мощность, относящуюся к каждой скорости.

Эту мощность можно измерить, используя кривую мощности каждой ветровой турбины [21].

Идеальная энергия рассчитывается путем умножения максимальной достигнутой скорости ветра на номинальную мощность.

Расчет производится для каждой предлагаемой ветровой турбины.

Siemens Gamesa SG 3.4-132 3.465MW:

$E_{actual} = 14,287,966.61$ МВт;

$E_{ideal} = 30,353,330.70$ МВт.

Таким образом, коэффициент использования мощности $CF = 47\%$.

CF Vestas V126-3.45 НТq:

$E_{actual} = 13,507,385.38$ МВт;

$E_{ideal} = 30,221,931.00$ МВт.

Таким образом, коэффициент использования мощности $CF = 45\%$.

CF Lagerwey L100-2.5 MW:

$E_{actual} = 8,825,895.03$ МВт;

$E_{ideal} = 30,353,330.70$ МВт.

Таким образом, коэффициент использования мощности $CF = 29\%$.

Коэффициент мощности для всех предложенных турбин, соответственно, считается действительно хорошим. CF для Lagerwey

L100-2,5 МВт имеет самое низкое значение, а для Siemens Gamesa SG 3,4-132 3,465 МВт – самое высокое. Однако с экономической точки зрения более низкое значение CF по сравнению с более высоким значением может оказаться целесообразнее, поскольку инвестиции в ветряную электростанцию с учетом цены турбины в этом случае могут значительно превысить прибыль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ площадки на юго-востоке Республики Татарстан для строительства ветровой электростанции мощностью 150 МВт с использованием 60 ветровых турбин.

2. Было проведено исследование местно-

сти расположения площадки под строительство ВЭС с целью уменьшения турбулентности и следа в максимально возможной степени.

3. Для учета и устранения неопределенностей была проведена оценка сдвига ветра на разных высотах.

4. При выборе ветровых турбин и их рационального расположения были рассмотрены и исследованы пределы ветровых турбин для определения расстояния между ними и оценки положения каждой ветровой турбины.

5. С экономической точки зрения при выборе ветровых турбин целесообразно учитывать не только коэффициент мощности, но и инвестиции в ветряную электростанцию с учетом стоимости турбин.

Список источников

1. Alzakkar A., Hassan F. A., Mestnikov N. Support of frequency stability in electrical power system at voltage 400 kV in Syria // *Advances in Automation II. RusAutoCon 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering* / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2020. Vol. 729. P. 891–902. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71119-1_86.
2. Costa A. M., Orosa J. A., Vergara D., Fernandez-Arias P. New tendencies in wind energy operation and maintenance // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 4. P. 1386. <https://doi.org/10.3390/app11041386>.
3. Van Haaren R., Fthenakis V. GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): evaluating the case for New York State // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. Iss. 7. P. 3332–3340. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.010>.
4. Heisler G. M. Mean wind speed below building height in residential neighbourhoods with different tree densities // *Scientific Journal*. 1990. Vol. 96. Iss. 1. P. 1389–1396.
5. Алали Ш., Алхадж Хассан Ф., Гайнуллина Л. Р. Разработка портативного электромиографа для фиксации биоэлектрических потенциалов, возникающих в мышцах // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2022. Vol. 22. Iss. 2. С. 87–95. <http://dx.doi.org/10.14529/ctcr220208>.
6. Blaabjerg F., Iov F., Kerekes T., Teodorescu R. Trends in power electronics and control of renewable energy systems // *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2010. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606696>.
7. Gao Cheng-kang, Na Hong-ming, Song Kai-hui, Dyer N., Tian Fan, Xu Qing-jiang, et al. Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind farms in different locations // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 102. P. 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.018>.
8. Firtin E., Guler O., Akdag S. A. Investigation of wind shear coefficients and their effect on electrical energy generation // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. Iss. 11. P. 4097–4105. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.025>.
9. Hassan F. A., Sidorov A. Study of power system stability: Matlab program processing data from Zahrani power plant (Beirut, Lebanon) // *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019: E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 124. P. 05011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405011>.
10. Епринцев С. А., Шекоян С. В. Анализ природного каркаса города Воронежа как фактора формирования микроклиматических условий // *Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 3–5 октября 2019 г.)*. Воронеж, 2019. Т. 2. С. 230–234.
11. Nasryov R. R., Aljendy R. I., Kherbek T. Study and analysis of power quality situation in electrical power network. Case study: Lattakia – Syria // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317193>.
12. Almohammed O. A. M., Timerbaev N. F., Ahmad B. I. Heat pump application for water distillation // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 2019. <https://doi.org/10.1109/fareastcon.2019.8934168>.
13. Hassan F. A. Multi-criteria approach and wind farm site selection analysis for improving power efficiency // *Journal of Human, Earth and Future*. 2020. Vol. 1. No. 2. P. 60–70. <https://doi.org/10.28991/HEF-2020-01-02-02>.
14. Zhang Ying, Guo Jianping, Yang Yuanjian, Wang Yu, Yim S. H. L. Vertical wind shear modulates particulate

matter pollutions: a perspective from radar wind profiler observations in Beijing // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Iss. 3. P. 546. <https://doi.org/10.3390/rs12030546>.

15. Medjber A., Guessoum A., Belmili H., Mellit A. New neural network and fuzzy logic controllers to monitor maximum power for wind energy conversion system // *Energy*. 2016. Vol. 106. P. 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.026>.

16. Wen Binrong, Wei Sha, Wei Kexiang, Yang Wenxian, Peng Zhike, Chu Fulei. Power fluctuation and power loss of wind turbines due to wind shear and tower shadow // *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 12. Iss. 3. P. 321–332. <https://doi.org/10.1007/s11465-017-0434-1>.

17. Mehdizadeh S. M., Alibeiki E., Khosravi A. Modelling and control of 6MG Siemens wind turbine blades angle and rotor speed // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2019. Vol. 11. Iss. 1. P. 80–100. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2019.11.1.5>.

18. Ali N., Hamilton N., DeLucia D., Cal R. B. Assessing

spacing impact on coherent features in a wind turbine array boundary layer // *Wind Energy Science*. 2018. Vol. 3. Iss. 1. P. 43–56. <https://doi.org/10.5194/wes-3-43-2018>.

19. Hassan F. A., Mahmoud M., Almohammed O. A. M. Analysis of the generated output energy by different types of wind turbines // *Journal of Human, Earth and Future*. 2020. Vol. 1. No. 4. P. 181–187. <https://doi.org/10.28991/HEF-2020-01-04-03>.

20. Ray M. L., Rogers A. L., McGowan J. G. Analysis of wind shear models and trends in different terrain // *University of Massachusetts*, 2006. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/251965566_Analysis_of_wind_shear_models_and_trends_in_different_terrain (14.04.2021).

21. Pandit R. K., Infield D., Kolios A. Gaussian process power curve models incorporating wind turbine operational variables // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 1658–1669. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.018>.

References

1. Alzakkar A., Hassan F. A., Mestnikov N. Support of frequency stability in electrical power system at voltage 400 kV in Syria. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds.). *Advances in Automation II. RusAutoCon 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Cham: Springer; 2020, vol. 729, p. 891–902. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71119-1_86.

2. Costa A. M., Orosa J. A., Vergara D., Fernandez-Arias P. New tendencies in wind energy operation and maintenance. *Applied Sciences*. 2021;11(4):1386. <https://doi.org/10.3390/app11041386>.

3. Van Haaren R., Fthenakis V. GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): evaluating the case for New York State. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(7):3332–3340. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.010>.

4. Heisler G. M. Mean wind speed below building height in residential neighbourhoods with different tree densities. *Scientific Journal*. 1990;96(1):1389–1396.

5. Alali Ch., Alhajj Hassan F., Gainullina L.R. Development of a portable electromyograph for fixing bioelectric potentials arising in muscles. *Razrabotka portativnogo elektromiografa dlya fiksatsii bioelektricheskikh potentsialov, voznikayushchikh v myshtsakh* // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika* = Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics. 2022. Vol. 22. Iss. 2. C. 87–95. <http://dx.doi.org/10.14529/ctcr220208>. (In Russ.).

6. Blaabjerg F., Iov F., Kerekes T., Teodorescu R. Trends in power electronics and control of renewable energy systems. In: *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2010. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606696>.

7. Gao Cheng-kang, Na Hong-ming, Song Kai-hui, Dyer N., Tian Fan, Xu Qing-jiang, et al. Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind

farms in different locations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;102:307–317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.018>.

8. Firtin E., Guler O., Akdag S. A. Investigation of wind shear coefficients and their effect on electrical energy generation. *Applied Energy*. 2011;88(11):4097–4105. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.025>.

9. Hassan F. A., Sidorov A. Study of power system stability: Matlab program processing data from Zahran power plant (Beirut, Lebanon). In: *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019: E3S Web of Conferences*. 2019;124:05011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405011>.

10. Eprintsev S. A., Shekoyan S. V. Analysis of the natural frame of Voronezh city as a formation factor of microclimatic conditions. *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii = Global climate change: regional effects, models, forecasts: proceedings of the International scientific and practical conference*. 3–5 October 2019, Voronezh. Voronezh; 2019, vol. 2, p. 230–234. (In Russ.).

11. Nasyrov R. R., Aljendy R. I., Kherbek T. Study and analysis of power quality situation in electrical power network. Case study: Lattakia – Syria. In: *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317193>.

12. Almohammed O. A. M., Timerbaev N. F., Ahmad B. I. Heat pump application for water distillation. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 2019. <https://doi.org/10.1109/fareastcon.2019.8934168>.

13. Hassan F. A. Multi-criteria approach and wind farm site selection analysis for improving power efficiency. *Journal of Human, Earth and Future*. 2020;1(2):60–70. <https://doi.org/10.28991/HEF-2020-01-02-02>.

14. Zhang Ying, Guo Jianping, Yang Yuanjian, Wang Yu,

Yim S. H. L. Vertical wind shear modulates particulate matter pollutions: a perspective from radar wind profiler observations in Beijing. *Remote Sensing*. 2020;12(3):546. <https://doi.org/10.3390/rs12030546>.

15. Medjber A., Guessoum A., Belmili H., Mellit A. New neural network and fuzzy logic controllers to monitor maximum power for wind energy conversion system. *Energy*. 2016;106:137-146.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.026>.

16. Wen Binrong, Wei Sha, Wei Kexiang, Yang Wenxian, Peng Zhike, Chu Fulei. Power fluctuation and power loss of wind turbines due to wind shear and tower shadow. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2017;12(3):321-332. <https://doi.org/10.1007/s11465-017-0434-1>.

17. Mehdizadeh S. M., Alibeiki E., Khosravi A. Modelling and control of 6MG Siemens wind turbine blades angle and rotor speed. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2019;11(1):80-100. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2019.11.1.5>.

18. Ali N., Hamilton N., DeLucia D., Cal R. B. Assessing spacing impact on coherent features in a wind turbine array boundary layer. *Wind Energy Science*. 2018;3(1):43-56. <https://doi.org/10.5194/wes-3-43-2018>.

19. Hassan F. A., Mahmoud M., Almohammed O. A. M. Analysis of the generated output energy by different types of wind turbines. *Journal of Human, Earth and Future*. 2020;1(4):181-187. <https://doi.org/10.28991/HEF-2020-01-04-03>.

20. Ray M. L., Rogers A. L., McGowan J. G. Analysis of wind shear models and trends in different terrain. In: *University of Massachusetts*, 2006. Available from: https://www.researchgate.net/publication/251965566_Analysis_of_wind_shear_models_and_trends_in_different_terrain [Accessed 14th April 2021].

21. Pandit R. K., Infield D., Kolios A. Gaussian process power curve models incorporating wind turbine operational variables. *Energy Reports*. 2020;6:1658-1669. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.018>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алхадж Хассан Фуад,

аспирант,
Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия

Алали Шариф,

магистрант,
Казанский федеральный университет,
420008, г. Казань, ул. Сайдашева, 12, Россия

Гайнуллина Лейсан Раисовна,

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Возобновляемые источники энергии»,
Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fouad Alhajj Hassan,

Postgraduate Student,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia

Charif Alali,

Master's Degree Student,
Kazan Federal University,
12 Saydashev St., Kazan 420008, Russia

Leysan R. Gainullina,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Renewable Energy Sources,
Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.02.2022; одобрена после рецензирования 27.04.2022; принята к публикации 30.05.2022.

Information about the article

The article was submitted 21.02.2022; approved after reviewing 27.04.2022; accepted for publication 30.05.2022.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.311:621.331

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-228-244>

Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации с помощью групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты

Юрий Николаевич Булатов^{1✉}¹Братский государственный университет, г. Братск, Россия¹bulatovyura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>

Резюме. Цель – определение эффективности управления и возможности устранения фликера в электроэнергетических системах и системах электроснабжения с установками распределенной генерации с помощью групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты. В качестве установки распределенной генерации рассматривалась малая тепловая электростанция, имеющая трансформаторную связь с электроэнергетической системой и состоящая из трех турбогенераторов мощностью 2,5 МВ·А каждый и напряжением 6 кВ. Также рассматривалась изолированная система электроснабжения с тремя газотурбинными установками мощностью 2,5 МВ·А каждая, работающими на статическую и двигательную нагрузки. Применялись методы теории автоматического управления. Исследования проводились в системе MatLab с помощью пакетов моделирования Simulink и SimPowerSystems. Полученные результаты моделирования показали, что при временном включении мощной нагрузки в узле присоединения установки распределенной генерации и использовании несогласованно настроенных регуляторов возникают колебания скорости вращения ротора и напряжения турбогенераторов, анализ которых свидетельствует о наличии фликера. К такому же эффекту может приводить и внезапное изменение времени прогноза для отдельных прогностических регуляторов скорости. Показано, что после отключения короткого замыкания длительностью 0,4 с вблизи газотурбинной установки возникает фликер напряжения. А при использовании локальных или групповых прогностических регуляторов удается решить проблему возникновения фликера. Применение групповых прогностических регуляторов позволяет более эффективно устранить фликер: уменьшается время переходного процесса в 1,7 раза для скорости вращения ротора генератора и в 2,7 раза – для напряжения; для напряжения практически устраняется перерегулирование. Результаты компьютерного моделирования подтвердили, что устранение фликера возможно путем применения группового управления прогностическими регуляторами скорости турбогенераторов. Аналогично для системы электроснабжения с газотурбинными установками использование прогностических алгоритмов управления позволило устранить фликер без решения задачи настройки регуляторов; при этом групповые прогностические регуляторы более эффективно устраняют фликер, улучшая показатели качества процесса управления.

Ключевые слова: установки распределенной генерации, фликер, прогностические регуляторы, групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты, моделирование

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

Для цитирования: Булатов Ю. Н. Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации с помощью групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 228–244. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-228-244>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Flicker elimination in grids with distributed generation using group predictive voltage and frequency regulators

Yuri N. Bulatov^{1✉}¹Bratsk State University, Bratsk, Russia¹bulatovyura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>

Abstract. In this work, we determine the control efficiency of grids with distributed generation and the possibility of eliminating flicker therein using group predictive voltage and frequency regulators. A small-size thermal power plant with the transformer connection to a power grid and consisting of three turbogenerators with a capacity of 2.5 MV·A each and a voltage of 6 kV was considered as a distributed generation plant. An isolated power supply system with three 2.5 MV·A gas turbine units each operating on static and motor loads was also considered. Automation control methods were used. Studies were conducted in the MatLab environment using the Simulink and SimPowerSystems simulation packages. The obtained results demonstrate that, upon temporarily activating the power load in the point of connecting a distributed generation unit and using inconsistent regulators, fluctuations occurring in the rotor speed and turbogenerator voltage indicate the presence of flicker effects. A similar situation can be caused by a sudden change in the forecast time for individual predictive speed controllers. Following the disconnection of a 0.4 s short circuit, a voltage flicker was found to occur in the vicinity of the gas turbine plant. However, local or group predictive regulators allow the problem of flicker emergence to be solved. The use of group predictive regulators allows flicker to be eliminated more effectively: the transient time is reduced by 1.7 and 2.7 times for the generator rotor speed and voltage, respectively. Moreover, for voltage, over-regulation is practically eliminated. The conducted computer simulation confirmed that flicker can be eliminated by applying group control of turbine generators using predictive speed controllers. Similarly, for a grid with gas turbine units, the use of predictive control algorithms made it possible to eliminate flicker without solving the problem of adjusting regulators. At the same time, group predictive regulators eliminate flicker more effectively, thereby improving the quality indicators of the control process.

Keywords: distributed generation plants, flicker, predictive controllers, group predictive voltage and frequency controllers, modeling

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

For citation: Bulatov Yu. N. Flicker elimination in grids with distributed generation using group predictive voltage and frequency regulators. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):228-244. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-228-244>.

ВВЕДЕНИЕ

С целью снижения потерь на передачу электроэнергии, повышения эффективности, живучести и надежности электроснабжения в электроэнергетических системах (ЭЭС) и системах электроснабжения (СЭС) могут применяться установки распределенной генерации (РГ) [1–6], которые, как правило, подключаются как можно ближе к потребителям электроэнергии.

При наличии установок РГ в ЭЭС их влияние на качество электроэнергии неоднозначно. Во-первых, установки РГ дают дополнительную возможность по регулированию напряжения в узлах электрической сети. Во-вторых, применение установок РГ позволяет уменьшить несимметрию, а также снизить искажения синусоидальности кривых напряжения и тока [7, 8]. При этом использование установок РГ в ЭЭС может вызывать колебания напряжения и частоты, приводящие к появлению фликера, под которым понимается ощущение неустойчивости зрительного восприятия [9, 10]. Как показывают исследования [11, 12], фликер может возникать при резком снижении напряжения в узле подключения установки РГ. Также неверно настроенные регуляторы установок РГ, как правило, повышают вероятность

появления этого эффекта.

Выявление и решение проблемы фликера является сложной задачей, так как это явление может возникать в разных режимах работы установок РГ и ЭЭС. Для анализа фликера может применяться компьютерное моделирование, но при этом необходимо точно определить взаимодействия между установками РГ и электроэнергетической системой.

Таким образом, перед использованием установок РГ в ЭЭС необходимо провести точную оценку их влияния на электрическую сеть, определить места подключения и оптимизировать алгоритм и настройку регуляторов. Решение этих задач позволит избежать возможного ухудшения качества электроэнергии в различных режимах работы ЭЭС и установок РГ. Проведенные ранее исследования [11, 12] показывают, что использование метода согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и скорости (АРС) синхронного генератора установки РГ, а также прогностических алгоритмов [13–15] позволяет улучшить качество управления напряжением и частотой и устранить фликер.

Цель данного исследования состояла в определении эффективности управления и возможности устранения фликера в ЭЭС и

СЭС с установками РГ с помощью групповых прогностических регуляторов напряжения и частоты. В статье представлено описание компьютерных моделей ЭЭС и СЭС с установками РГ, АРВ, АРС и групповыми прогностическими регуляторами. Приводятся результаты моделирования при возмущении, вызываемом возникновением фликера, и предложены способы его устранения.

ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ МАЛОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, ИМЕЮЩЕЙ СВЯЗЬ С ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В качестве установки РГ рассматривалась малая тепловая электростанция (ТЭС), расположенная вблизи потребителей энергии и имеющая трансформаторную связь с ЭЭС большой мощности (рис. 1).

Малая ТЭС состояла из трех турбогенераторов с номинальной мощностью 2,5 МВ·А каждый и напряжением 6 кВ. Нагрузка потребителей электроэнергии показана на рис. 1. Исследования проводились в системе MatLab, где с помощью пакетов имитационного моделирования Simulink и SimPowerSystems была построена соответствующая компьютерная модель, представленная на рис. 2.

Синхронные генераторы ТЭС моделировались стандартными блоками синхронных машин пакета SimPowerSystems системы MatLab (блоки Synchronous Machine на рис. 2), параметры которых приведены на рис. 3 а. Структурная схема модели паровой турбины (блоки Steam turbine на рис. 2) показана на рис. 3 б.

Возбудители синхронных генераторов (блоки Exciter на рис. 2) представлены следующей передаточной функцией [16]:

$$\frac{1}{0,025s + 1}.$$

Скорость вращения ротора и напряжение у генераторов регулируются с помощью АРС и АРВ, соответственно. Подробное описание используемых моделей АРС и АРВ (блоки ASC и AVC на рис. 2), в том числе с прогнозирующими звеньями, приведено в работе [14]. Модели АРС генераторов использовали пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) алгоритм управления и описывались следующей передаточной функцией:

$$W_{ASC} = K_p + K_i \cdot \frac{1}{0,1s} + K_d \cdot \frac{1}{s+1}, \quad (1)$$

где K_p , K_i , K_d – коэффициенты настройки ПИД-регулятора; s – оператор Лапласа.

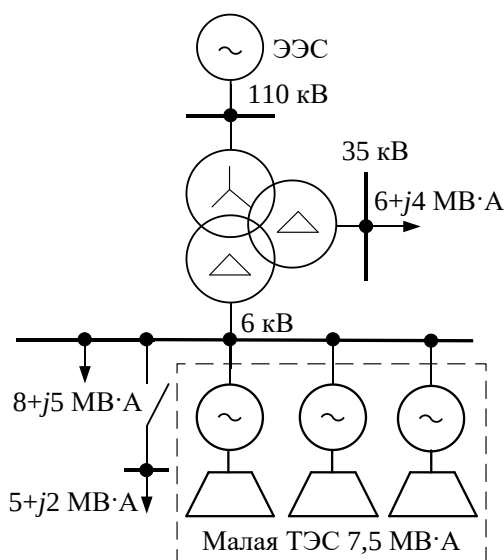


Рис. 1. Схема исследуемой сети
Fig. 1. Diagram of the network under study

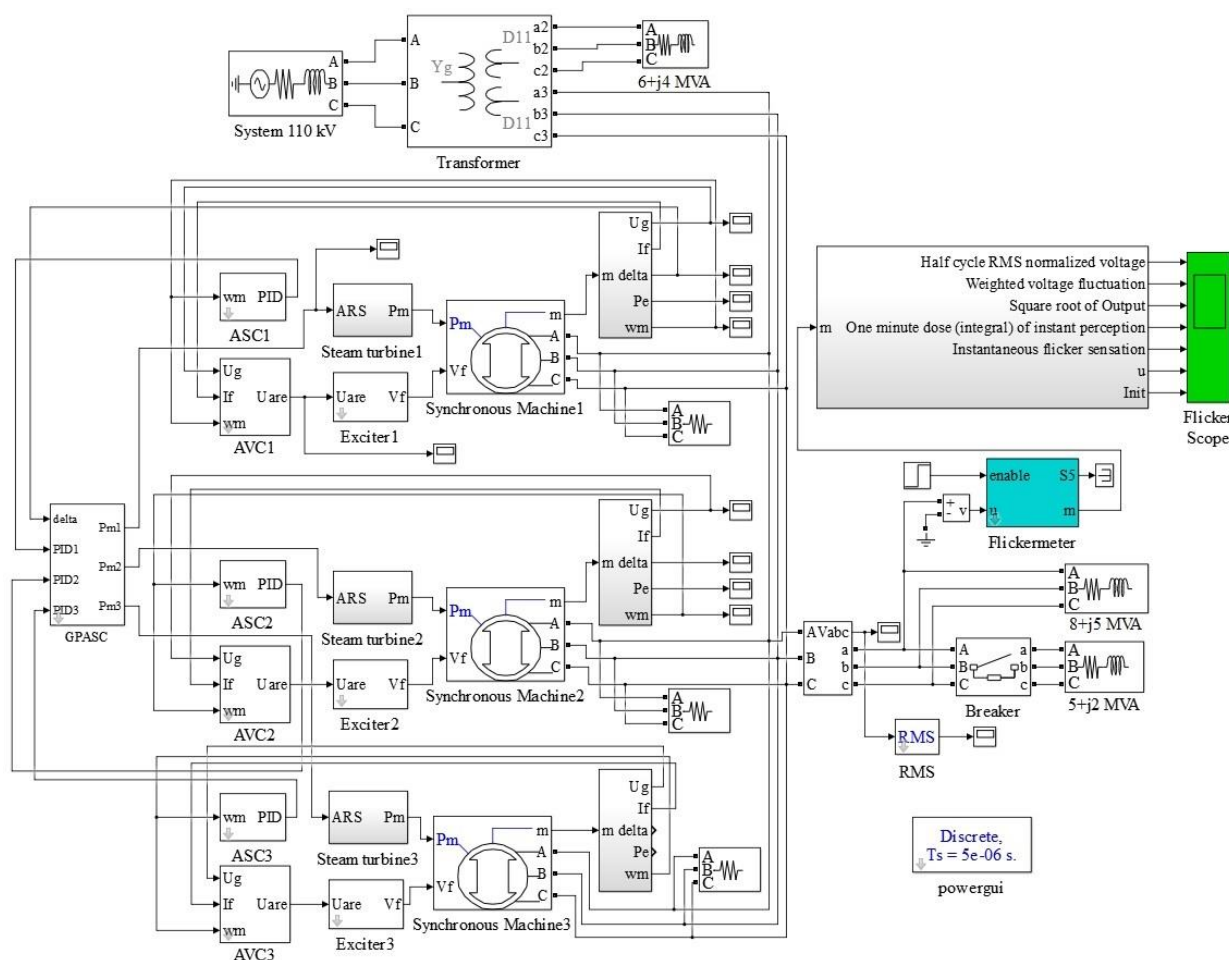


Рис. 2. Схема компьютерной модели малой тепловой электростанции
Fig. 2. Diagram of a computer model of a small thermal power plant

Схема Simulink-модели предлагаемого группового прогностического автоматического регулятора скорости (ГПАРС) показана на рис. 4, в котором постоянная времени прогноза вычислялась по частоте собственных колебаний ротора ведущего генератора [16, 17] и изменялась в зависимости от угла нагрузки δ по следующему выражению:

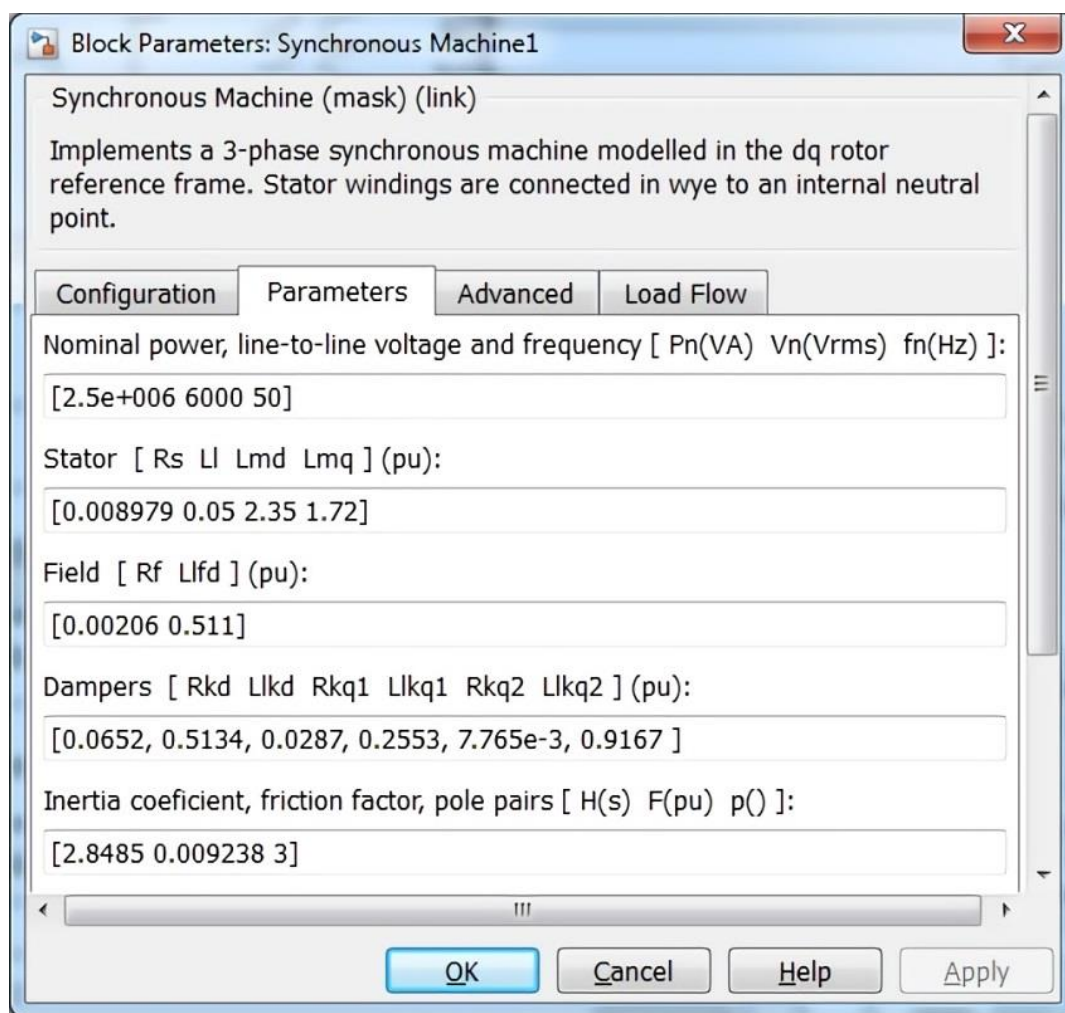
$$T_p = \frac{1}{0,7004 \cdot \sqrt{\cos \delta}}. \quad (2)$$

В модели использовался стандартный блок пакета SimPowerSystems системы MatLab – Flickermetr (см. рис. 2), в котором реализована модель цифрового фликерметра в соответствии с международным стандартом МЭК 61000-4-15.

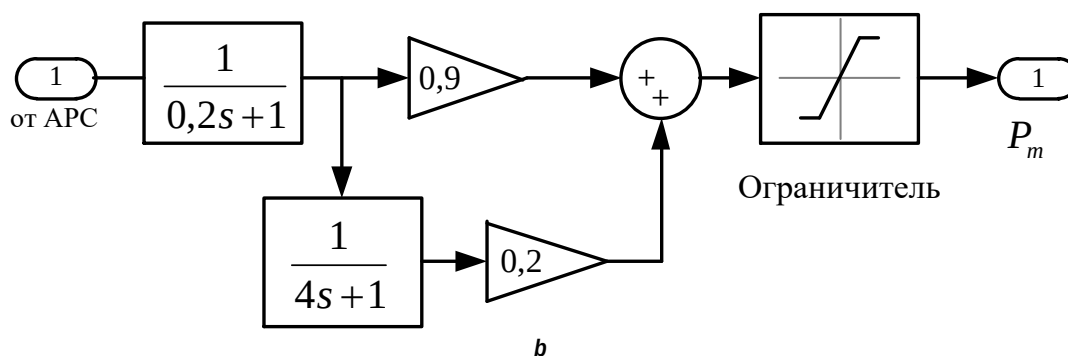
Фликер создавался временным включением в узле подключения малой ТЭС допол-

нительной нагрузки мощностью 5+j2 МВ·А, которая была в 2 раза больше мощности отдельного генератора установки РГ. Исследования проводились для модели с несогласованно настроенными АРВ и АРС турбогенераторов, а также при использовании ГПАРС с несогласованно и согласованно настроенными регуляторами. Методика согласованной настройки АРВ и АРС приведена в [18].

Результаты моделирования показывают, что при временном включении нагрузки в узле присоединения малой ТЭС и использовании несогласованно настроенных АРВ и АРС (настройка регуляторов выбиралась исходя из практических соображений) возникают колебания скорости вращения ротора и напряжения турбогенераторов. Соответствующие временные зависимости параметров турбогенератора показаны на рис. 5, где также приводятся показания фликерметра (рис. 5 с).



a



b

Рис. 3. Окно параметров модели синхронного генератора (а) и структурная схема Simulink-модели паровой турбины (b)

Fig. 3. Parameter window of a synchronous generator model (a) and a block diagram of a steam turbine Simulink model (b)

Для анализа полученных колебаний напряжения и выделения возникшего шума использовалось вейвлет-преобразование. Построение зависимости спектральной плотности мощности (SPD) от частоты (рис. 6) выполнялось методом Берга [19], по которой видно, что SPD выделенного шума обратно

пропорционально частоте. Таким образом, выделенный шум можно отнести к фликер-шуму [20, 21].

В работе [12] показано, что применение прогностических алгоритмов управления в АРВ и АРС позволяет устранить фликер. Однако при различных значениях постоянной

времени прогноза для отдельных турбогенераторов и при несогласованной настройке APB и APC также наблюдаются процессы, приводящие к появлению фликера и без подключения дополнительной нагрузки. Соответствующие зависимости напряжения в узле подключения установки РГ и показания фликерметра при внезапном изменении постоянной времени прогнозирующего звена APC показаны на рис. 7. Анализ полученных колебаний напряжения, а также показания фликерметра свидетельствуют о наличии фликера.

Для устранения фликера предлагается использовать групповое управление прогностическими APC (схема ГПАРС показана на рис. 4), а также согласование настроек APB и APC турбогенераторов. Результаты моделирования показывают, что и при несогласованной настройке регуляторов, но при использовании ГПАРС удастся решить проблему возникновения фликера. При этом согласование настроек APB и APC позволяет несколько снизить возникающее перерегули-

рование скорости и напряжения после отключения мощной нагрузки. Соответствующие временные зависимости скорости вращения ротора, напряжения турбогенератора, а также показания фликерметра приводятся на рис. 8.

Таким образом, применение группового прогностического регулятора скорости турбогенераторов одной установки РГ позволяет избежать возникновения фликера и при неоптимальной или неправильной настройке APB и APC. Также необходимо отметить, что используемая схема ведущего генератора в ГПАРС (см. рис. 4) не позволяет выставлять разные значения постоянных времени прогнозирующих звеньев в APC, что препятствует появлению фликера.

Таким образом, предлагаемый групповой регулятор скорости для синхронных генераторов малой ТЭС позволяет исключить вероятность возникновения фликера при кратковременном включении мощной нагрузки в узле с установкой РГ и без решения задачи настройки регуляторов.

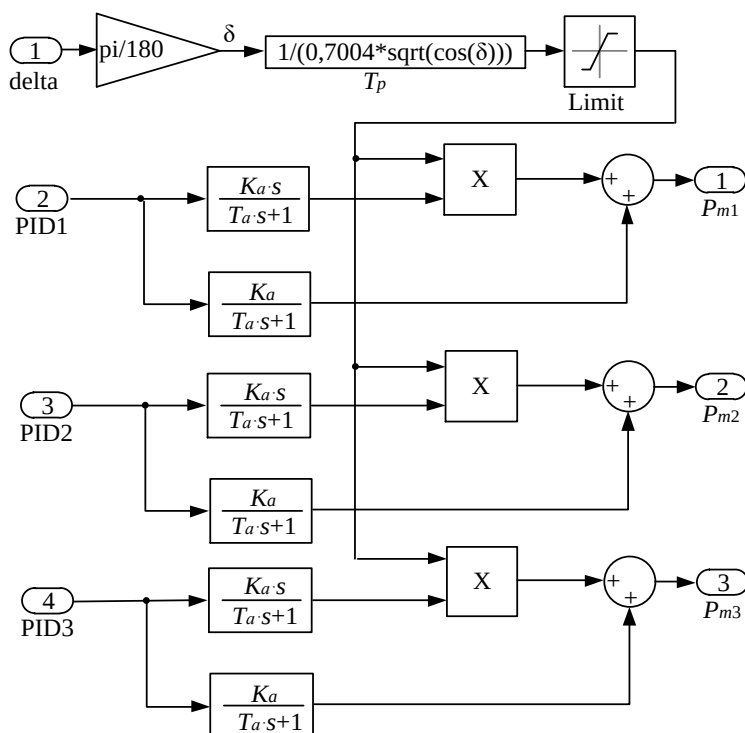


Рис. 4. Схема Simulink-модели группового прогностического автоматического регулятора скорости с одним общим блоком определения времени прогноза T_p

Fig. 4. Diagram of the Simulink model of the automatic group predictive speed controller with one common block determining the forecast time T_p

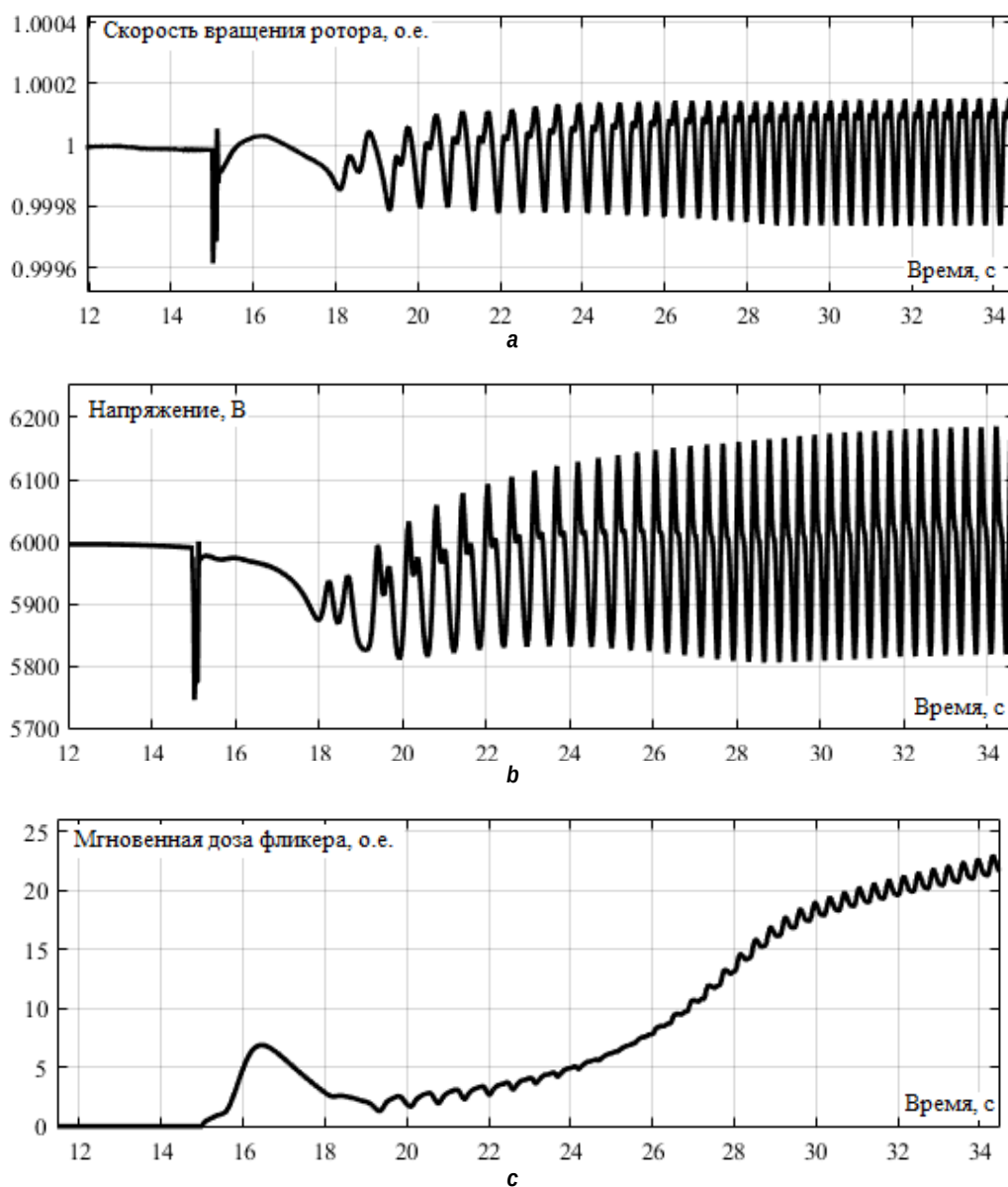


Рис. 5. Скорость вращения ротора генератора (а), напряжение в узле (b) и показания фликерметра (с) при временном включении мощной нагрузки: использовались автоматические регуляторы возбуждения и автоматические регуляторы скорости с типовыми настройками

Fig. 5. Rotation speed of the generator rotor (a), voltage in the node (b) and flickermeter readings (c) under temporary activation of a powerful load: automatic excitation controllers and automatic speed controllers with typical settings were used

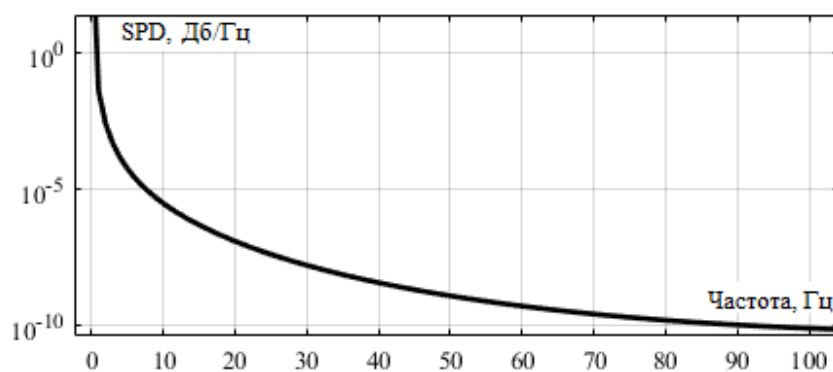


Рис. 6. Зависимость спектральной плотности мощности от частоты
Fig. 6. Power spectral density vs frequency

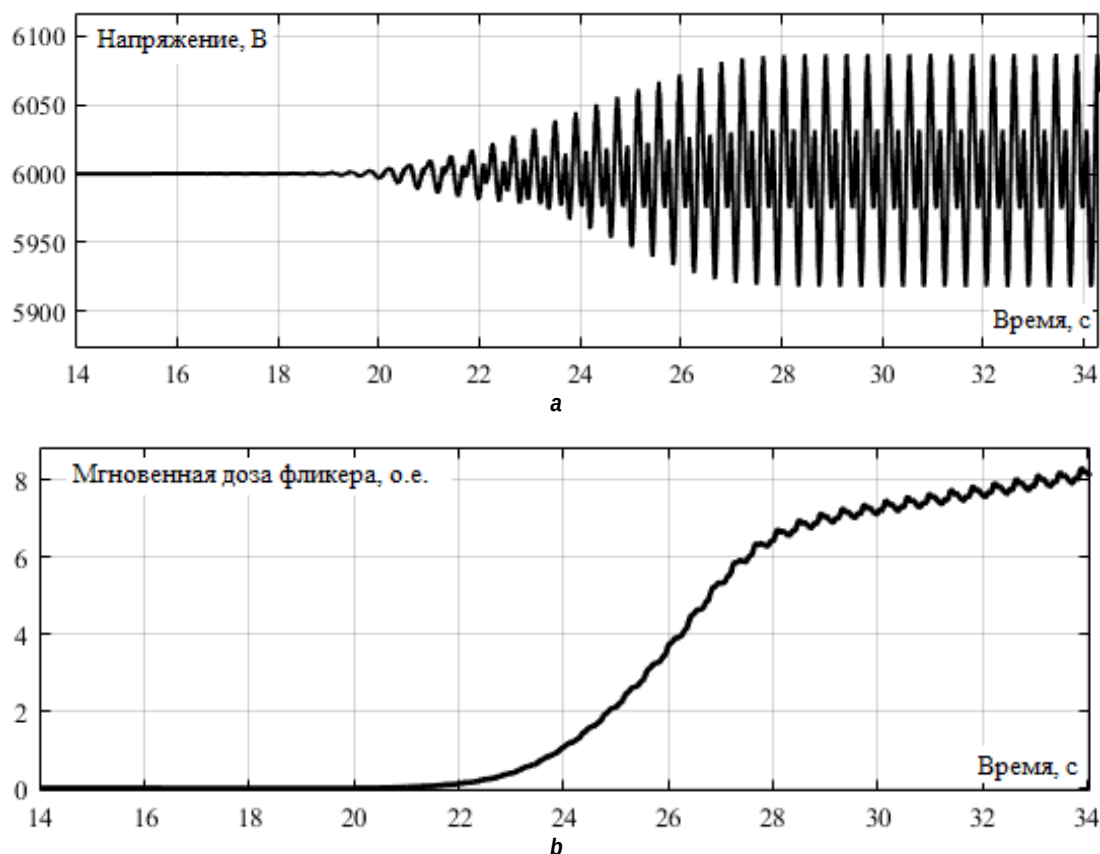


Рис. 7. Временные зависимости напряжения (а) и показания фликерметра (b) при разном времени прогноза у автоматических регуляторов скорости: использовались прогностические несогласованно настроенные автоматические регуляторы возбуждения и автоматические регуляторы скорости
Fig. 7. Time dependences of voltage (a) and flickermeter readings (b) at different forecast times of automatic speed controllers: uncoordinated predictive automatic excitation controllers and automatic speed controllers were used

ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКОЙ. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Моделировалась изолированная СЭС с тремя параллельно работающими однотипными газотурбинными установками (ГТУ) мощностью 2,5 МВ·А каждая. В изолированной СЭС работала статическая активно-индуктивная нагрузка мощностью $0,944 + j0,47$ МВ·А и асинхронный двигатель (АД) мощностью 670 кВт, подключенные через кабельные линии (КЛ) (рис. 9).

Схема разработанной в MatLab модели изолированной СЭС представлена на рис. 10. В модели предусматривалось внесение возмущения в виде подключения дополнительной активно-индуктивной нагрузки мощностью $0,944 + j0,37$ МВ·А, запуска АД мощ-

ностью 670 кВт (блок AD 670 kW на рис. 10), а также кратковременного трехфазного короткого замыкания (КЗ) с помощью блока Three-Phase Fault. В качестве исходного принимался нормальный установившийся режим с загрузкой каждого генератора на 37%.

В ГТУ используются модели двухвальных газовых турбин (блоки Gas turbine на рис. 10), структурная схема которых представлены на рис. 11 [22]. При моделировании принимались следующие значения передаточных коэффициентов: коэффициент усиления мощности турбины газогенератора $K_t = 0,55$; передаточный коэффициент редуктора $K_r = 5,56$.

В качестве синхронных генераторов использовались модели трехфазной синхронной машины пакета SimPowerSystems системы MatLab. При моделировании использовались следующие основные параметры машины (блоки Synchronous Machine на рис.

10): мощность $S = 2,5$ МВ·А; сопротивление обмотки статора по продольной оси $X_d = 2,34$ о.е.; электродвижущая сила генератора $E_q = 1,25$ о.е.; номинальное напряжение

$U_G = 1$ о.е. Эквивалентная постоянная механической инерции ГТУ (турбины и генератора) составляла $T_{je} = 3,76$ с.

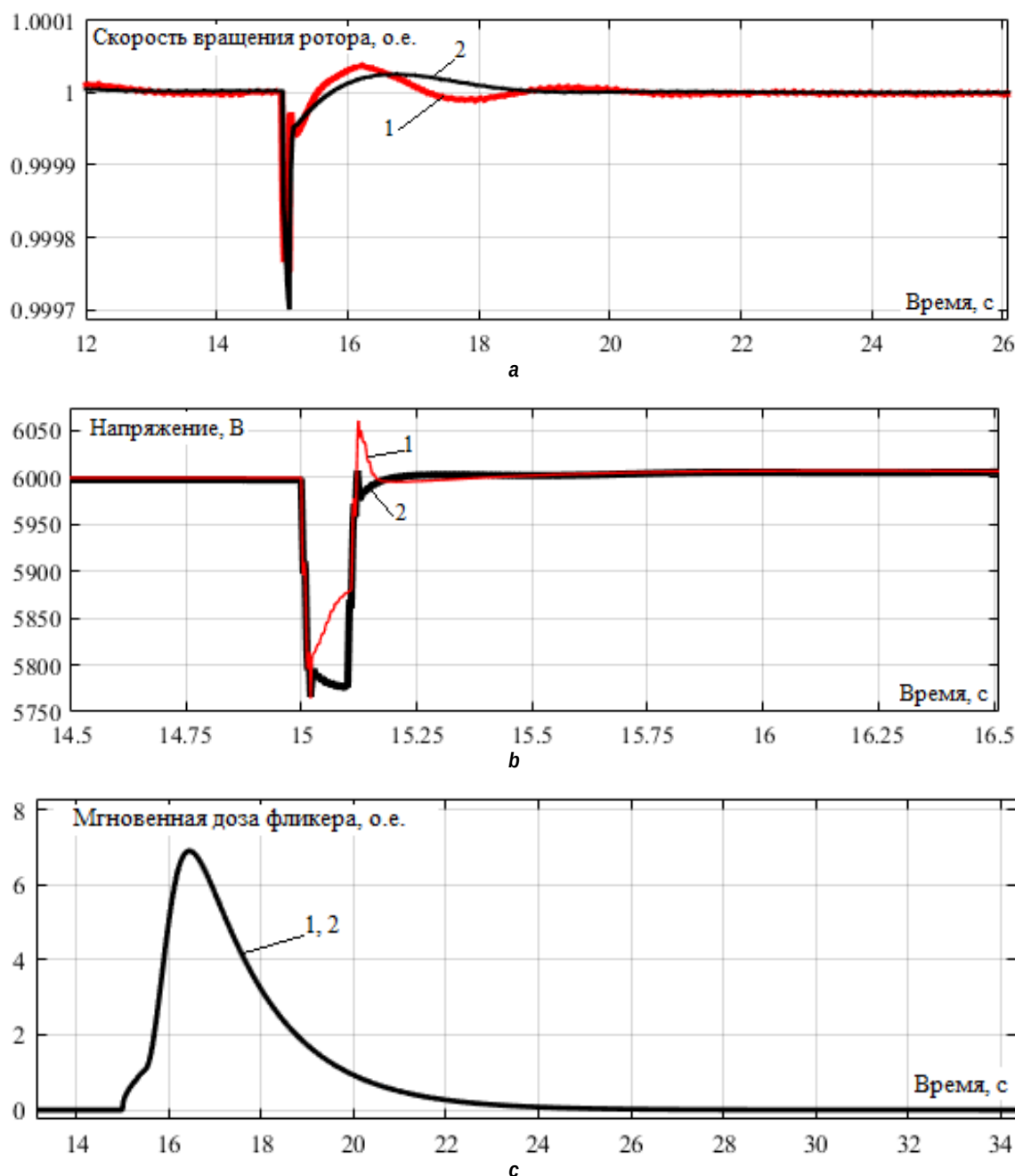


Рис. 8. Скорость вращения ротора генератора (а), напряжение в узле (b) и показания фликерметра (с) при временном включении мощной нагрузки: 1 – использовался предлагаемый групповой прогностический автоматический регулятор скорости с несогласованно настроенными автоматическими регуляторами возбуждения и автоматическими регуляторами скорости; 2 – использовался групповой прогностический автоматический регулятор скорости с согласованно настроенными автоматическими регуляторами возбуждения и автоматическими регуляторами скорости

Fig. 8. Rotation speed of the generator rotor (a), voltage in the node (b) and flickermeter readings (c) under the temporary activation of a powerful load: 1 – the proposed automatic group predictive speed controller was used with uncoordinated automatic excitation controllers and automatic speed controllers; 2 – an automatic group predictive speed controller was used with coordinated automatic excitation controllers and automatic speed controllers

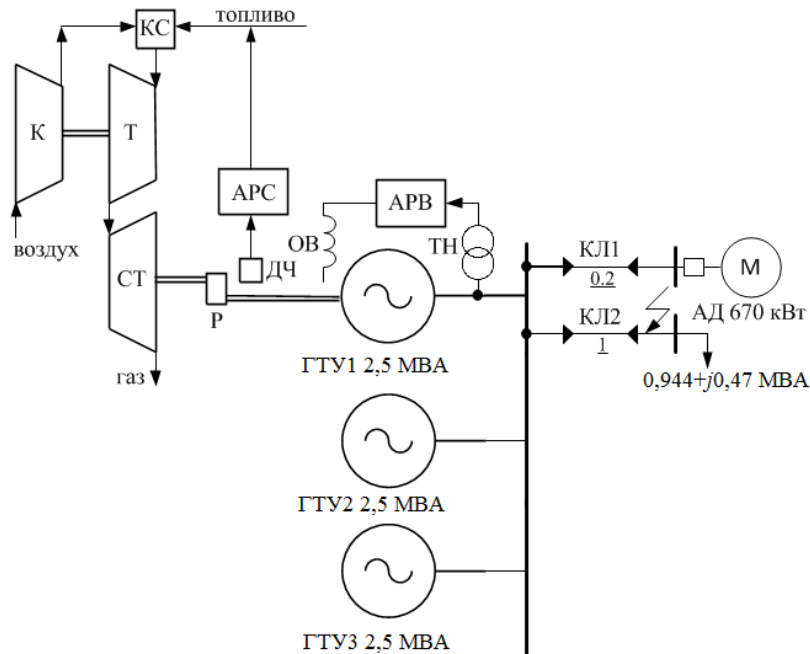


Рис. 9. Схема исследуемой изолированной системы электроснабжения: К – компрессор, КС – камера сгорания, СТ – силовая турбина, Т – турбина, ОВ – обмотка возбуждения, ТН – трансформатор напряжения, ДЧ – датчик частоты вращения

Fig. 9. Diagram of the isolated power supply system under study: К – compressor, CS – combustion chamber, ST – power turbine, Т – turbine, OV – excitation winding, TN – voltage transformer, DC – speed sensor

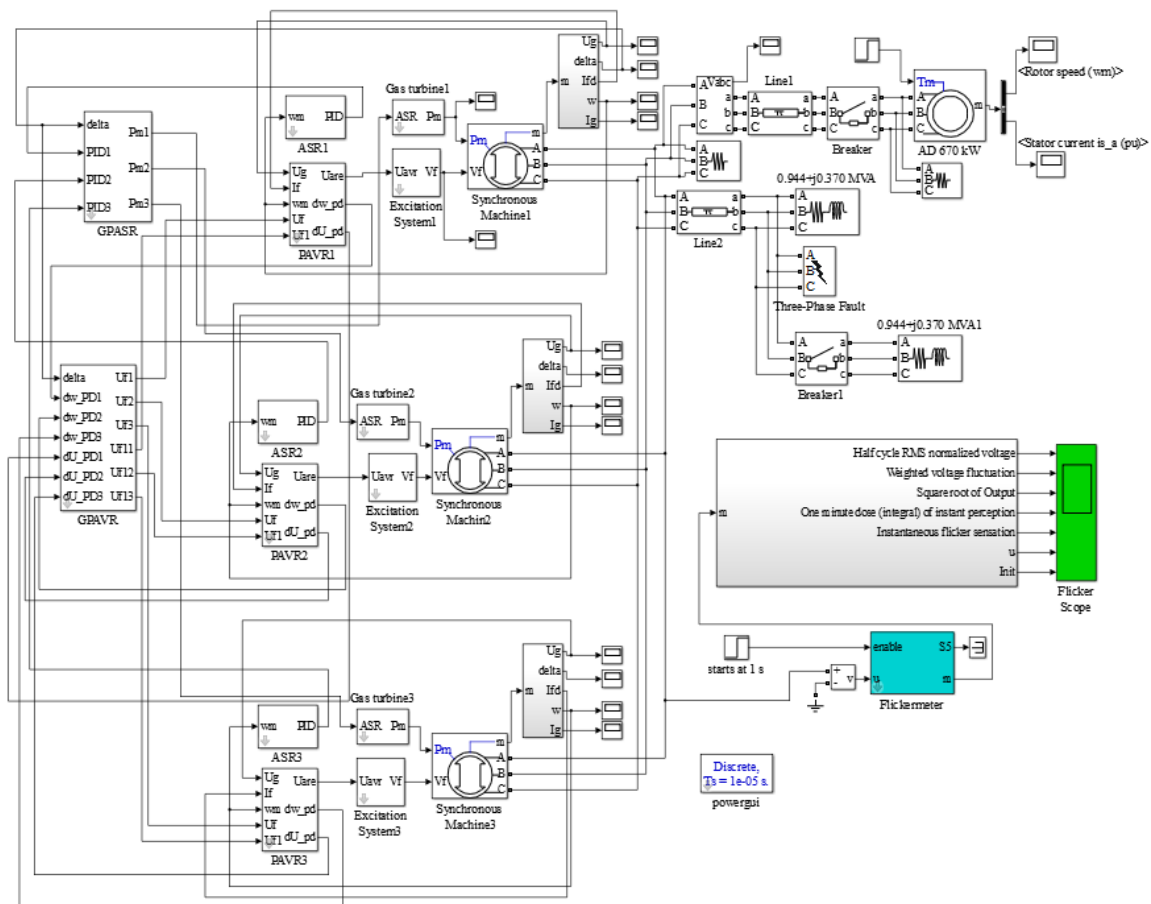


Рис. 10. Схема модели изолированной системы электроснабжения с газотурбинными установками в MatLab
Fig. 10. Diagram of the model of the isolated power supply system with gas turbine plants in MatLab

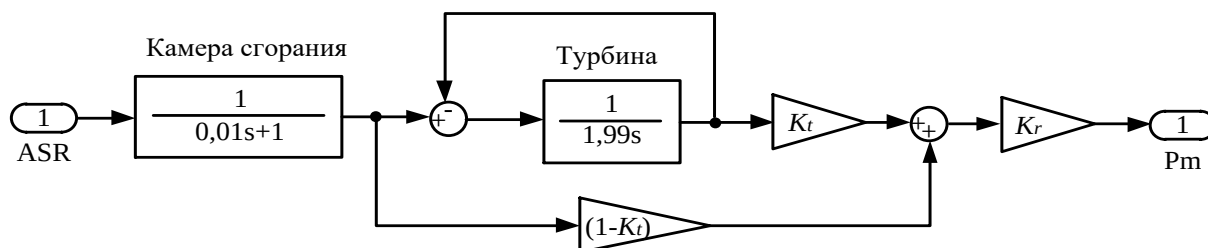


Рис. 11. Схема Simulink-модели двухвальной газовой турбины
Fig. 11. Diagram of the Simulink model of a two-shaft gas turbine

Модели возбудителей синхронных генераторов, АРС, а также ГПАРС принимались такими же, что и для модели ТЭС, описанной выше. Схемы используемых моделей прогностических АРС и АРВ, позволяющих автоматически рассчитывать в зависимости от угла нагрузки δ ведущего генератора постоянные времени прогностических звеньев и изменять

их в различных режимах работы [14], показаны на рис. 12. Прогнозирующие звенья в АРВ предлагается установить отдельно в каналы регулирования по напряжению и частоте между обозначенными на рис. 12 *b* входами dU_pd , $Uf1$ и dw_pd , Uf , соответственно. Время прогноза АРВ вычисляется аналогично прогностическому АРС (рис. 12 *a*).

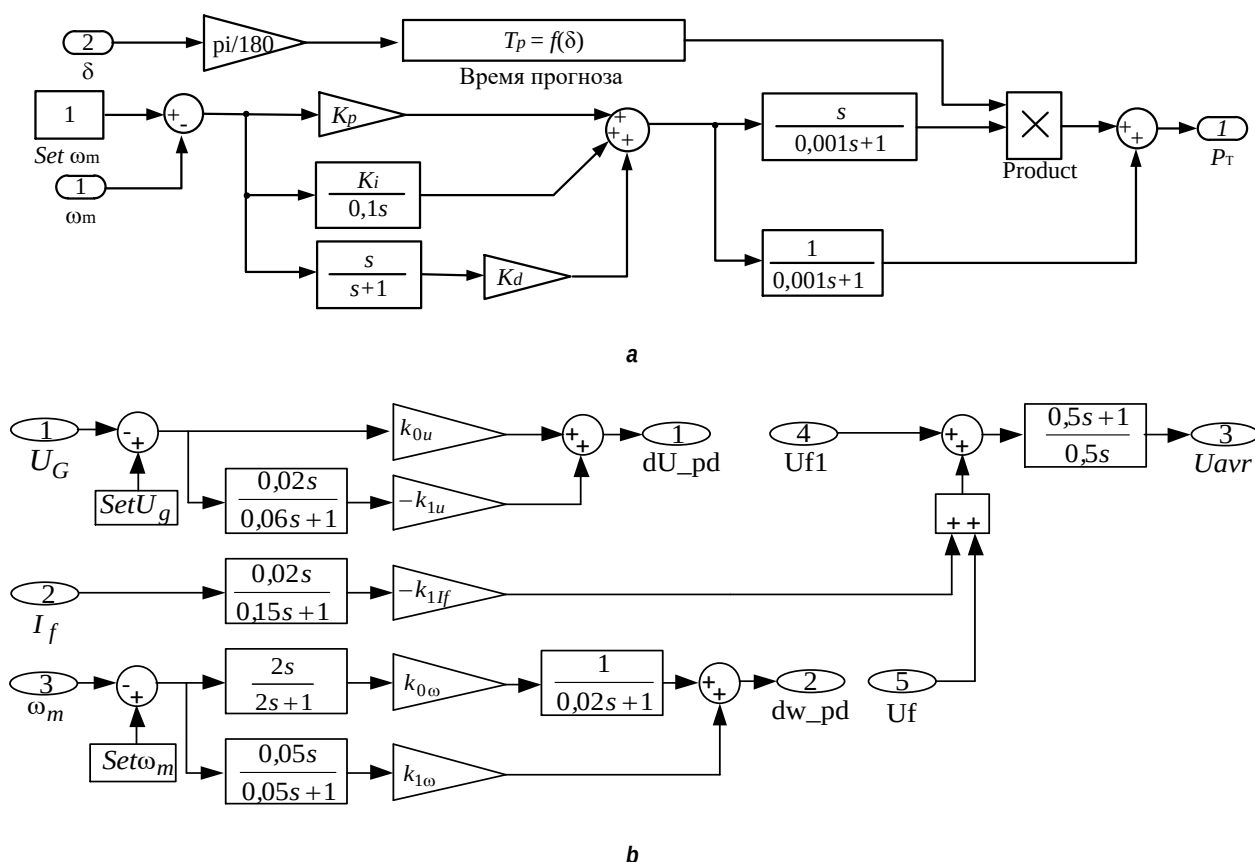


Рис. 12. Схемы Simulink-моделей прогностического автоматического регулятора скорости (а) и автоматического регулятора возбуждения (b): K_p , K_i , K_d – коэффициенты настройки автоматического регулятора скорости; k_{0u} , k_{1u} , k_{1lf} , k_{0w} , k_{1w} – коэффициенты настройки автоматического регулятора возбуждения; $Set \omega_m$ – уставка по скорости ротора; $Set U_g$ – уставка по напряжению
Fig. 12. Diagrams of Simulink models of predictive automatic speed controller (a) and automatic excitation controller (b): K_p , K_i , K_d – adjustment coefficients of the automatic speed controller; k_{0u} , k_{1u} , k_{1lf} , k_{0w} , k_{1w} – adjustment coefficients of the automatic excitation controller; $Set \omega_m$ – rotor speed setting; $Set U_g$ – voltage setting

Схема используемой модели группового прогностического автоматического регулятора напряжения (ГПАРН) аналогична схеме ГПАРС, представленной на рис. 4. При моделировании коэффициенты настройки локальных регуляторов принимались следующими: для АРС $K_p = 1$, $K_i = 1$ и $K_d = 7$; для АРВ $k_{0u} = 5$, $k_{1u} = 1$, $k_{1f} = 0$, $k_{0w} = -0,01$, $k_{1w} = -0,001$.

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

Фликер создавался при трехфазном КЗ вблизи ГТУ длительностью 0,4 с. Необходимо отметить, что при моделировании КЗ в составе СЭС работал АД. Также требуется подчеркнуть, что настройка АРВ и АРС генераторов во всех рассматриваемых режимах и способах регулирования не изменялась.

Результаты моделирования показывают, что после отключения КЗ длительностью 0,4 с в рассматриваемой системе с несогласованно настроенными АРВ и АРС возникают колебания скорости вращения ротора и напряжения генераторов. Генераторы теряют устойчивую синхронную работу, и колебания напряжения значительно усиливаются. Соответствующие временные зависимости параметров ГТУ показаны на рис. 13 а и б. На рис. 13 с приводятся показания фликерметра, которые свидетельствуют о появлении в СЭС фликера напряжения. Нужно отметить о временном затухании фликера после отключения КЗ и о возобновлении колебаний в дальнейшем с большей интенсивностью (рис. 13 с).

Для устранения фликера предлагаются прогностические локальные и групповые регуляторы. Результаты моделирования показывают, что и при использовании локальных прогностических АРВ и АРС удастся решить проблему возникновения фликера после отключения близкого КЗ. Соответствующие временные зависимости представлены на рис. 14. При этом применение групповых регуляторов ГПАРС и ГПАРН позволяет

уменьшить время переходного процесса в 1,7 раза для скорости вращения ротора генератора (рис. 14 а) и в 2,7 раза – для напряжения (рис. 14 б). Для напряжения также наблюдается устранение перерегулирования при использовании ГПАРС и ГПАРН. Фликерметр при отключении КЗ показывает резкое снижение колебаний; при этом использование групповых регуляторов позволяет быстрее устранить фликер (рис. 14 с).

Таким образом, использование прогностических алгоритмов управления позволяет устранить фликер, возникающий после отключения близкого к установкам РГ КЗ, без решения задачи настройки регуляторов; при этом групповые прогностические регуляторы напряжения и скорости позволяют более эффективно устранить фликер, улучшая показатели качества процесса управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам компьютерного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. При временном включении мощной нагрузки в узле присоединения установки РГ и использовании несогласованно настроенных регуляторов возникают колебания скорости вращения ротора и напряжения турбогенераторов, анализ которых свидетельствует о наличии фликера.

2. В результате внезапного изменения постоянной времени прогноза для отдельных АРС турбогенераторов и при несогласованной настройке регуляторов напряжения и скорости также наблюдаются процессы, приводящие к появлению фликера и без подключения дополнительной нагрузки.

3. Применение группового прогностического регулятора скорости турбогенераторов одной установки РГ позволяет избежать возникновения фликера и при неоптимальной или неправильной настройке АРВ и АРС. Кроме этого, используемая схема ведущего генератора в групповом регуляторе не позволяет выставлять разные постоянные времени прогнозирующих звеньев в АРС, что также препятствует появлению фликера.

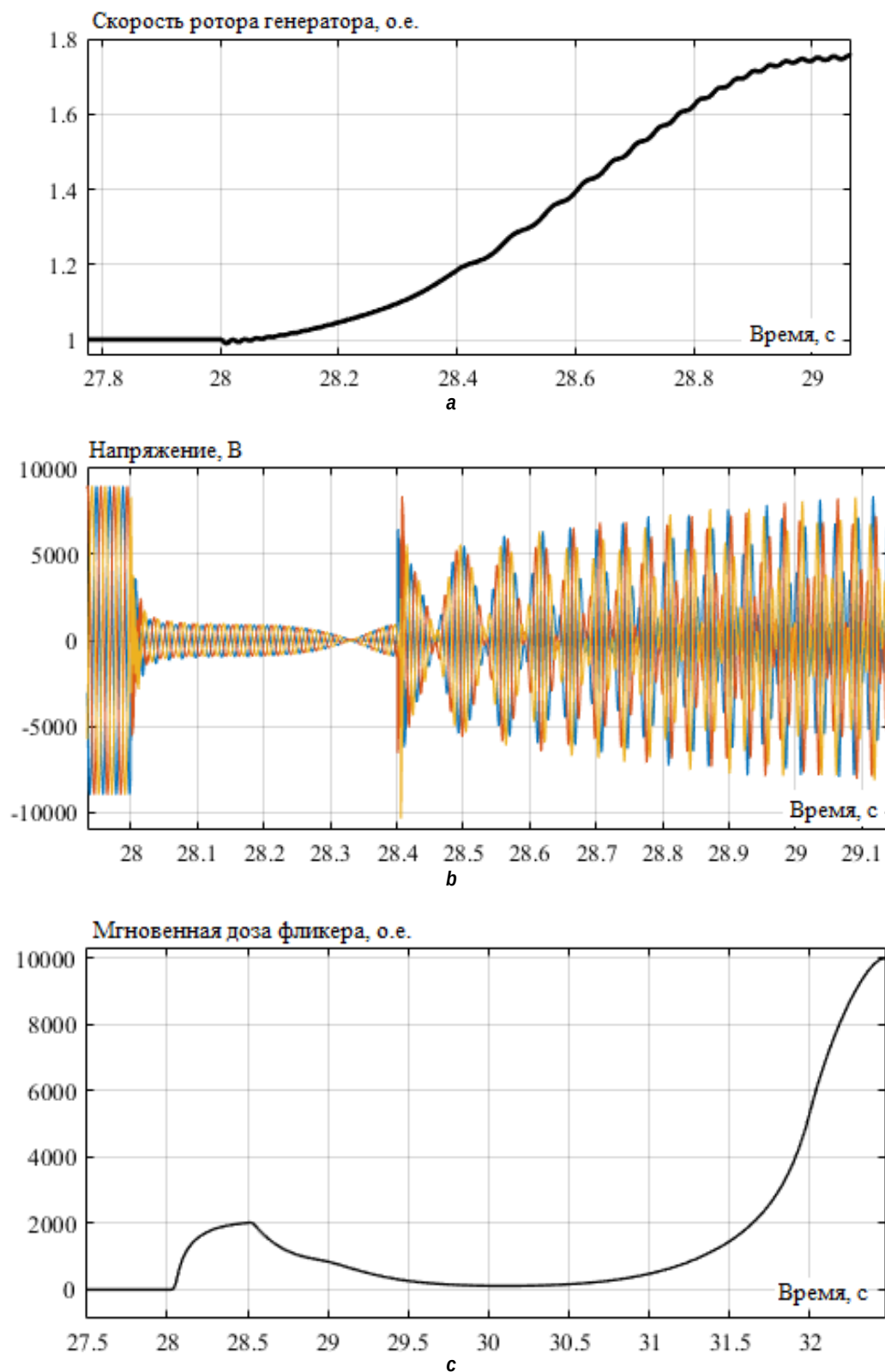


Рис. 13. Скорость вращения ротора генератора (а), напряжение (b) и показания фликерметра (с) при кратковременном трехфазном коротком замыкании вблизи газотурбинных установок: использовались несогласованно настроенные автоматические регуляторы возбуждения и автоматические регуляторы скорости

Fig. 13. Rotation speed of the generator rotor (a), voltage (b) and flickermeter readings (c) under a short-term three-phase short circuit near gas turbine installations: uncoordinated automatic excitation controllers and automatic speed controllers were used

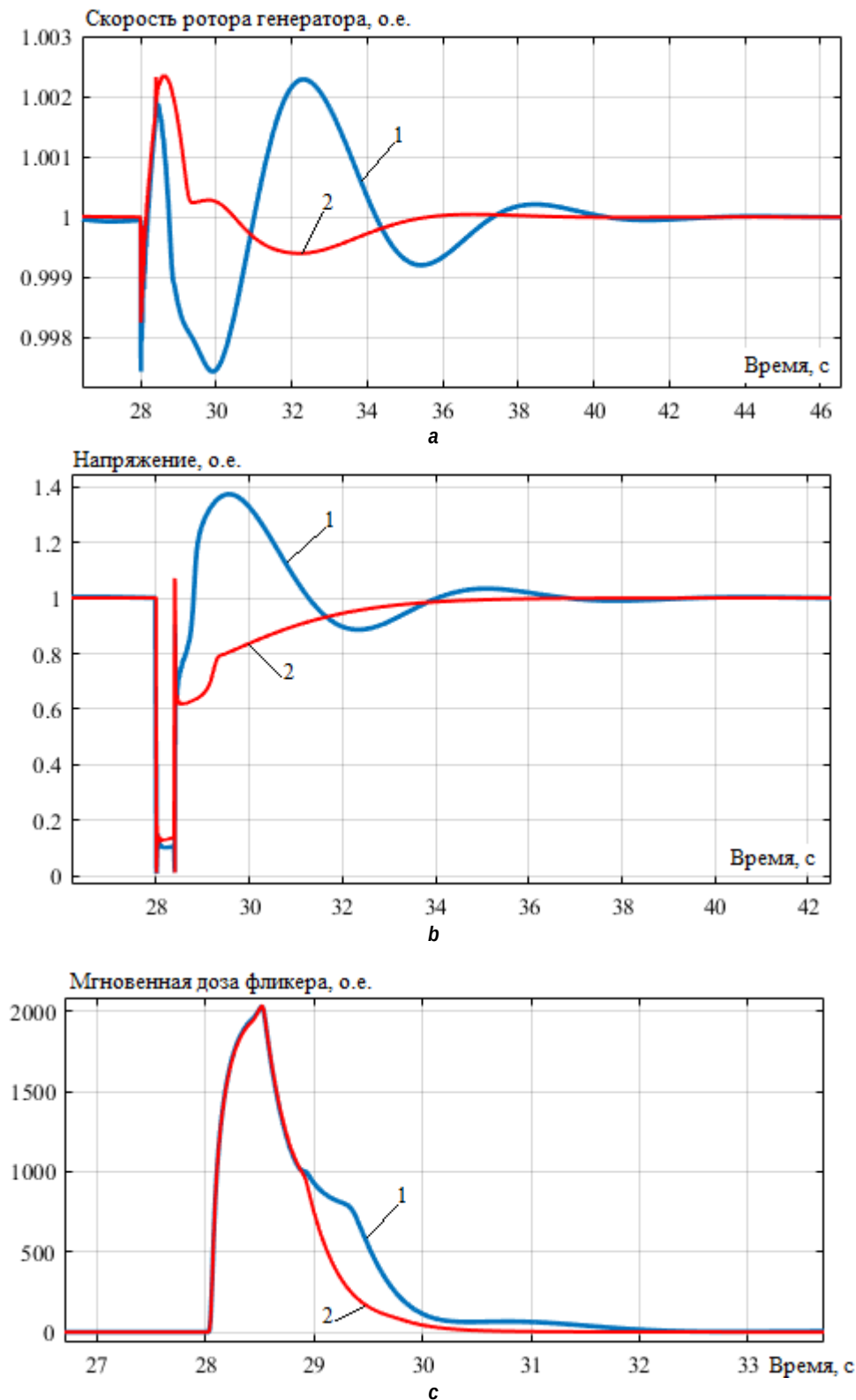


Рис. 14. Скорость вращения ротора генератора (а), напряжение (б) и показания фликерметра (в) при кратковременном трехфазном коротком замыкании вблизи газотурбинных установок: 1 – использовались прогностические автоматические регуляторы возбуждения и автоматические регуляторы скорости; 2 – использовались групповые прогностические автоматические регуляторы скорости и групповые прогностические автоматические регуляторы напряжения

Fig. 14. Rotation speed of the generator rotor (a), voltage (b) and flickermeter readings (c) under a short-term three-phase short circuit near gas turbine installations: 1 – predictive automatic excitation controllers and automatic speed controllers were used; 2 – automatic group predictive speed controllers and automatic group predictive voltage controllers were used

4. Согласование настроек АРВ и АРС позволяет устранить фликер и несколько снизить возникающее перерегулирование скорости и напряжения в узле присоединения установки РГ после отключения мощной нагрузки.

5. Результаты моделирования показывают, что после отключения КЗ длительностью 0,4 с в рассматриваемой СЭС с ГТУ и несогласованно настроенными АРВ и АРС возникают колебания скорости вращения ротора и напряжения генераторов, приводящие к фли-

керу. При использовании локальных прогностических АРВ и АРС удается решить проблему возникновения фликера после отключения близкого КЗ. При этом применение групповых прогностических регуляторов позволяет более эффективно устранить фликер: уменьшается время переходного процесса в 1,7 раза для скорости вращения ротора генератора и в 2,7 раза – для напряжения; для напряжения практически устраняется перерегулирование.

Список источников

1. Voropai N. I., Stychinsky Z. A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
2. Sheryazov S. K., Shelubaev M. V., Obukhov S. G. Renewable sources in system distributed generation // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076247>.
3. Blaabjerg Frede, Yang Yongheng, Yang Dongsheng, Wang Xiongfei. Distributed power-generation systems and protection // Proceedings of the IEEE. 2017. Vol. 105. Iss. 7. P. 1311–1331. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2696878>.
4. Venkataraman S., Ziesler C., Johnson P., Van Kempen S. Integrated wind, solar, and energy storage: designing plants with a better generation profile and lower overall cost // IEEE Power and Energy Magazine. 2018. Vol. 16. Iss. 3. P. 74–83. <https://doi.org/10.1109/MPE.2018.2793478>.
5. Rhia R. Al., Daghrour H., Alsamara M. Optimal location of distributed generation and its impacts on voltage stability // 12th International Renewable Engineering Conference. 2021. <https://doi.org/10.1109/IREC51415.2021.9427838>.
6. Verma R., Kashyap M. DG Penetration in distribution networks: a review // 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems. 2021. P. 1144–1147. <https://doi.org/10.1109/ICACCS51430.2021.9441813>.
7. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Nguen V. H. Effect of distributed generation plants' automatic controllers on power quality factors // Energy Systems Research 2019: International Conference of Young Scientists. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 114. Iss. 2. P. 04004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911404004>.
8. Sikorski T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks // Power Quality Issues in Distributed Generation. 2015. Vol. 1. Iss. 6. P. 34–41. <https://doi.org/10.15199/48.2015.06.05>.
9. Barker P. P., De Mello R. W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems // Power Engineering Society Summer Meeting (Seattle, 16–20 July 2000). Seattle: IEEE, 2000. Vol. 3. P. 222–233. <https://doi.org/10.1109/PESS.2000.868775>.
10. Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. Embedded Generation. London: IEEE, 2000, 273 p.
11. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V. Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation // 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378834>.
12. Bulatov Yu., Kryukov A., Nguyen Van Huan. Flicker control in mains with distributed generation plants // EN-ERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209. P. 07001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907001>.
13. Pashchenko F., Pikina G., Rodomanova Yu. Universal searchless method for parametric optimization of predictive algorithms // 13th IEEE International Conference on Control & Automation (Ohrid, 3–6 July 2017). Ohrid: IEEE, 2017. P. 952–957. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2017.8003189>.
14. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Nguyen Van Huan. Automatic predictive controllers of distributed generators // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2018. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602718>.
15. Pikina G. A., Pashchenko F. F., Pashchenko A. F. Synthesis, research and comparative analysis of predictive control algorithms // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271646>.
16. Vittal V., McCalley J. D., Anderson P. M., Fouad A. A. Power system control and stability. 3rd Edition. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2002. 832 p.
17. Бушуев В. В., Лизалек Н. Н., Новиков Н. Л. Динамические свойства энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
18. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm // 2nd International Conference on Industrial Engineering,

Applications and Manufacturing. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911456>.
 19. Castanie F. Digital spectral analysis: parametric, non-parametric, and advanced methods. ISTE Ltd, 2006. 400 p. <https://doi.org/10.1002/9781118601877>.
 20. Voss R. F. 1/f (flicker) noise: a brief review // 33rd Annual Symposium on Frequency Control (Atlantic City, 30 May – 1 June 1979). Atlantic City: IEEE, 1979. P. 40–46. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1979.200297>.

21. Gorban I. I. Statistically instable processes: connection with flicker, nonequilibrium, fractal and colored noise // Radioelectronics and Communications Systems. 2012. Vol. 55. P. 99–114. <https://doi.org/10.3103/S0735272712030016>.
 22. Меркурьев Г. В., Шаргин Ю. М. Устойчивость энергосистем. В 2-х т., т. 2. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2008. 376 с.

References

1. Voropai N. I., Stychinsky Z. A. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität; 2010, 223 p.
 2. Sheryazov S. K., Shelubaev M. V., Obukhov S. G. Renewable sources in system distributed generation. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076247>.
 3. Blaabjerg Frede, Yang Yongheng, Yang Dongsheng, Wang Xiongfei. Distributed power-generation systems and protection. In: *Proceedings of the IEEE*. 2017;105(7):1311-1331. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2696878>.
 4. Venkataraman S., Ziesler C., Johnson P., Van Kempen S. Integrated wind, solar, and energy storage: designing plants with a better generation profile and lower overall cost. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2018;16(3):74-83. <https://doi.org/10.1109/MPE.2018.2793478>.
 5. Rhia R. Al., Daghrour H., Alsamara M. Optimal location of distributed generation and its impacts on voltage stability. In: *12th International Renewable Engineering Conference*. 2021. <https://doi.org/10.1109/IREC51415.2021.9427838>.
 6. Verma R., Kashyap M. DG Penetration in distribution networks: a review. In: *7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*. 2021;1144-1147. <https://doi.org/10.1109/ICACCS51430.2021.9441813>.
 6. Verma R., Kashyap M. DG Penetration in distribution networks: a review. In: *7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*. 2021;1144-1147. <https://doi.org/10.1109/ICACCS51430.2021.9441813>.
 7. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Nguen V. H. Effect of distributed generation plants' auto-matic controllers on power quality factors. In: *Energy Systems Research 2019: International Conference of Young Scientists. E3S Web of Conferences*. 2019;114(2):04004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911404004>.
 8. Sikorskii T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks. *Power Quality Issues in Distributed Generation*. 2015;1(6):34-41. <https://doi.org/10.15199/48.2015.06.05>.
 9. Barker P. P., De Mello R. W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems. In: *Power Engineering Society Summer Meeting*. 16–20 July 2000, Seattle. Seattle: IEEE; 2000;3:222-233.

<https://doi.org/10.1109/PESS.2000.868775>.
 10. Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. *Embedded Generation*. London; IEEE; 2000, 273 p.
 11. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V. Solving the flicker noise origin problem by optimally controlled units of distributed generation. In: *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378834>.
 12. Bulatov Yu., Kryukov A., Nguyen Van Huan. Flicker control in mains with distributed generation plants. In: *ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management: E3S Web of Conferences*. 2020;209:07001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907001>.
 13. Pashchenko F., Pikina G., Rodomanova Yu. Universal searchless method for parametric optimization of predictive algorithms. In: *13th IEEE International Conference on Control & Automation*. 3–6 July 2017, Ohrid. Ohrid: IEEE; 2017; p. 952-957. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2017.8003189>.
 14. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Nguyen Van Huan. Automatic prognostic regulators of distributed generators. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 2018. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602718>.
 15. Pikina G. A., Pashchenko F. F., Pashchenko A. F. Synthesis, research and comparative analysis of predictive control algorithms. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271646>.
 16. Vittal V., McCalley J. D., Anderson P. M., Fouad A. A. *Power system control and stability*. 3rd Edition. Hoboken: Wiley-IEEE Press; 2002, 832 p.
 17. Bushuev V. V., Lizalek N. N., Novikov N. L. *Dynamic properties of power systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1995, 320 p. (In Russ.).
 18. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911456>.
 19. Castanie F. *Digital spectral analysis: parametric, non-parametric, and advanced methods*. ISTE Ltd; 2006, 400 p. <https://doi.org/10.1002/9781118601877>.
 20. Voss R. F. 1/f (flicker) noise: a brief review. In: *33rd Annual Symposium on Frequency Control*. 30 May – 1 June 1979, Atlantic City. Atlantic City: IEEE; 1979, p. 40-46. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1979.200297>.
 21. Gorban I. I. Statistically instable processes: connec-

tion with flicker, nonequilibrium, fractal and colored noise. In: *Radioelectronics and Communications Systems*. 2012;55:99-114.
<https://doi.org/10.3103/S0735272712030016>.
22. Merkuriev G. V., Shargin Yu. M. *Power system stabil-*

ity. In 2 vol., vol. 2. St. Petersburg: Non-state private educational institution of additional professional education Center for Training Energy Personnel; 2008, 376 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

Критерии авторства

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.01.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 03.06.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Authorship criteria

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

Conflict of interests

The author declares 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 article

The article was submitted 26.01.2022; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 03.06.2022.



Научная статья

УДК 622.69.019.3:620.9.338.9

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-245-259>

Методы учета надежности поставки первичных энергоресурсов на электростанции при анализе надежности электроэнергетических систем

Татьяна Владимировна Дзюбина^{1✉}, Ковалёв Геннадий Федорович²,
Крупенёв Дмитрий Сергеевич³

¹⁻³ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

¹tvleo@isem.irk.ru

²kovalev@isem.irk.ru

³krupenev@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3093-4483>

Резюме. Целью данной работы является обоснование различных подходов (поузлового, системного и оценочного) к оценке надежности электроэнергетических систем с учетом надежного снабжения топливом электрических станций при проведении анализа их соответствия объектам и задачам исследования. Для оценки надежности как электроэнергетических, так и газоснабжающих систем используется метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Для расчета дефицита мощности в электроэнергетических системах – метод внутренних точек, для расчета минимума затрат в газоснабжающих системах – метод Басакера – Гоуэна. Для расчета показателей надежности этих систем применяются методы теории вероятностей: расчет рядов распределения вероятностей, теоремы сложения и умножения вероятностей. Для расчета рядов распределения случайных состояний систем топливоснабжения и электроснабжения при исследовании предлагаемых подходов (поузлового, системного и оценочного) использовалась схема независимых испытаний на основе формулы Бернулли, а также теоремы сложения и умножения и вероятностей, метод композиции рядов распределения. Все подходы (поузловой, системный и оценочный) к оценке надежности электроэнергетических систем, с учетом надежного снабжения топливом электрических станций, апробированы на примерах: «поузловой» и «системный» – на условных примерах топливоснабжающих и электроэнергетических систем, а «оценочный» – на расчетных схемах системы газоснабжения и энергосистемы Северо-Западного федерального округа. Предложено несколько методических подходов – «поузловой», «системный» и «оценочный». Для расчетов надежности покрытия нагрузки энергетических систем следует использовать подходы, отталкиваясь от технологических особенностей рассматриваемых систем и структурной схемы их соединений, а также целесообразность их применения в плане точности получаемых результатов, затрат времени на исследование, сложности поиска и подготовки исходных данных и форм их представления в модели.

Ключевые слова: топливоснабжающая система, электроэнергетическая система, комплексное исследование, обеспеченность электростанций топливом, показатели надежности

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003) Программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Дзюбина Т. В., Ковалёв Г. Ф., Крупенёв Д. С. Методы учета надежности поставки первичных энергоресурсов на электростанции при анализе надежности электроэнергетических систем // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 245–259. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-245-259>.

Reliability methods for delivery of primary energy resources at a power plant during a reliability audit of electric energy systems

Tatiana V. Dzyubina^{1✉}, Gennady F. Kovalev², Dmitry S. Krupenev³

¹⁻³ Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

¹tvleo@isem.irk.ru

²kovalev@isem.irk.ru

³krupenev@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3093-4483>

Abstract. Various approaches (nodal, system and estimation) to assessing the reliability of electric power systems, including the effectiveness of fuel supply, are compared and evaluated. A method of statistical testing (Monte Carlo method) is used to assess the reliability of electric power and gas supply systems. For calculating power shortages in electric power systems, the internal points method was used; in order to calculate minimum costs in gas supply systems, the Basaker-Gowan method was used. To calculate the reliability indicators of these systems, probability theory methods were employed, including calculation of probability distribution series, addition and multiplication theorems. Independent tests based on the Bernoulli formula, addition and multiplication theorems, as well as the composition method of distribution series, were used to calculate the distribution series of random states for fuel and electricity supply systems when examining the proposed approaches (nodal, system and estimation approaches). All approaches (nodal, system and estimation) to assessing the reliability of electric power systems, including reliable fuel supply to electric power plants, were evaluated using the following examples: "nodal" and "system" using nominal examples of fuel-supply and electric power systems, as well as "evaluation" using the computational schemes of gas supply and power systems of the North-West Federal District. It is recommended to apply approaches depending on the technological characteristics of the given systems and their connection structure for calculating the base-load provision reliability of energy systems, as well as their feasibility regarding the accuracy of the obtained results, time consumption and the complexity of the data search, preparation and presentation in the model.

Keywords: fuel supply system, electric power system, integrated study, power plant fuel status, reliability indicators

Acknowledgements: The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0003) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period 2021-2030 with the use of the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project no 13.MARC.21.0038).

For citation: Dzyubina T. V., Kovalev G. F., Krupenev D. S. Reliability methods for delivery of primary energy resources at a power plant during a reliability audit of electric energy systems. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):245-259. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-245-259>.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексное исследование надежности электроэнергетической системы (ЭЭС) предполагает оценку обеспеченности ее всеми видами ресурсов, в частности, наиболее актуальным является обеспеченность первичными энергоресурсами: топливом (газ, уголь, мазут и др.) для тепловых электростанций (ТЭС), водой в водохранилищах для гидроэлектростанций, ядерным материалом для атомных электростанций.

Из всех видов топлива для ТЭС в силу своей экологичности, экономичности и доступности наиболее актуальным является природный газ. Его доля в общем объеме топлива составляет в настоящее время по некоторым региональным ЭЭС до 70–90%⁴.

После 2030 г. генерация электричества на газе должна вырасти, по прогнозам специалистов, в 1,9 раза [1, 2], а в мировом энергетическом балансе доля газа должна возрасти к 2040 г. до 24%⁵ [3]. При этом газ, в отличие от других видов топлива, не может запасаться на электростанциях.

В связи с вышеизложенным, авторы провели исследования надежности газоснабжающих (ГСС) и электроэнергетических систем при их совместной работе [4–6].

Вопросы интеграции (совместного функционирования) систем электро-, газо- и теплоснабжения также нашли отражение в отечественных и зарубежных работах [7–15]. Если в [7–10] рассматриваются модели [7, 9, 10] и методы [8] для решения задач опти-

мального потокораспределения для интегрированных систем электро- и газоснабжения для одного или нескольких периодов времени [9, 10], то в [11] предлагается распределенная система управления для таких систем.

В работе [9] предлагается смешанный подход целочисленного и линейного программирования к оптимизации планирования развития систем передачи природного газа и электричества. Этот подход учитывает неисправности вида $N - 1$ как в системе природного газа, так и в электроэнергетической системе. Обращается внимание на повышенную опасность появления аварийных ситуаций в системе природного газа, которые ставят под угрозу безопасность всей интегрированной энергосистемы. К недостаткам работы следует отнести ограниченность рассмотрения непредвиденных событий уровнем $N - 1$ случайностей.

Более широкая постановка приведена в работах [13, 14], где речь идет о функционировании интегрированной энергетической системы, состоящей из электро-, газо- и теплоснабжающей систем. Работа [13] представляет метод унифицированной идентификации и определения местоположения неисправностей с использованием анализа больших данных. Здесь понятие «неисправность» не включает в себя понятие «частичного отказа», как принято в теории надежности. В работе [14] рассматривается влияние аварийной ситуации на газопроводе на топливоснабжение источников электро- и теплоэнергии. Близкой по тематике можно считать работу [15], где рассматривается влияние газоснабжающей системы на надежность электроэнергетической системы.

Комплексный анализ надежности ЭЭС с учетом надежности системы снабжения электростанций топливом может осуществляться двумя способами [4, 6, 15]:

- 1) сначала оценивается надежность топливоснабжающей системы (ТСС), затем осуществляется учет последствий ее отказов на надежность ЭЭС;

- 2) рассматривается совместная работа ТСС и ЭЭС путем моделирования отказов в обеих системах на основе стохастического

разыгрывания.

Авторами был предложен и апробирован «системный» подход – осуществлен анализ надежности газоснабжающей системы Северо-Западного федерального округа (СЗФО) и надежности электроэнергетической системы данного ФО [4–6]. Здесь же был продекларирован и «поузловой» подход, хотя исследования по нему не проводились.

В исследованиях по «системному» подходу комплексный анализ надежности совместной работы ГСС и ЭЭС осуществлялся первым способом, т.е. сначала моделировалась работа ГСС и оценивалась ее надежность, а затем моделировалось функционирование ЭЭС с учетом последствий отказов в ГСС. Для этих целей использовались математические модели анализа надежности сложных ГСС [16] и ЭЭС [17].

В публикациях авторов, посвященных оценке надежности ЭЭС с учетом надежности ГСС, а именно – с учетом надежного снабжения газом электрических станций (ЭС), работающих на газе, не всегда обосновывается правомерность применения той или иной методики с позиции точности отображения технико-экономических свойств исследуемых объектов в расчетной модели⁵ [4–6]. Поэтому научной новизной данной работы являются следующие положения:

- 1) рассмотрение методик с анализом их соответствия объектам и задачам исследования, а также целесообразности их использования в отношении затрат времени на расчеты надежности, сложности подготовки исходных данных, наличия необходимых данных и форм их представления в модели;

- 2) учет частичных отказов [18, 19];

- 3) более широкая постановка задачи – рассматривается не только снабжение станций, работающих на газе, но и на любом другом виде топлива (уголь, мазут и др.), т.е. сначала анализируется надежность топливоснабжающей системы с учетом ее особенностей, а затем оценивается ее влияние на надежность электроснабжения;

- 4) более подробное рассмотрение «поузловое» и «системное» подходов по сравнению с [5, 6], а также предлагается третий, «оценочный», подход.

Проведен сравнительный анализ нескольких способов расчета надежности ЭЭС с учетом надежности ТСС.

Если говорить об отличии исследований надежности по соответствующим подходам, то «поузловой» подход подразумевает сначала оценку надежности топливоснабжающего узла, который обслуживает конкретный узел ЭЭС. Здесь рассматриваются два подхода: 1) эталонный и 2) с использованием коэффициента снабжения. Эталонный – это самый затратный в отношении расчетов способ, дающий наиболее точные результаты. При «системном» подходе оценивается надежность всей ТСС в целом, а не отдельного ее узла, и происходит расчет надежности ЭЭС двумя способами: с учетом корректировки 1) аварийности генерирующего оборудования ЭЭС или 2) ряда распределения генерирующей мощности. При «оценочном» подходе рассчитываются интервалы показателя надежности ЭЭС – вероятности бездефицитного снабжения потребителей электроэнергией. Нижняя граница получается после оценки надежности узлов ТСС и ЭЭС путем перемножения соответствующих вероятностей, а верхняя – выявляется при абсолютно надежной работе ТСС.

Для расчетов надежности покрытия нагрузки энергетических систем следует выполнять расчеты, отталкиваясь от технологических особенностей рассматриваемых систем и структурной схемы их соединений.

Наиболее универсальным представлением случайных величин является закон распределения (функция или ряд) в наиболее подробной форме (с достаточно большим числом ступеней). Поэтому все исследуемые в работе модели сравниваются с этим эталонным представлением.

ПОУЗЛОВОЙ ПОДХОД

Учет надежности ТСС при расчете надежности ЭЭС в случае «поузлового» подхода осуществляется путем учета надежности в зависимости от аварийности оборудования системы, непосредственно снабжаю-

щей топливом определенный узел ЭЭС.

Анализ надежности ТСС производится в предположении ее независимой работы от ЭЭС (иногда это не так, но данный вопрос здесь не рассматривается). В результате анализа надежности топливоснабжающей системы с учетом ее особенностей находится ряд распределения вероятностей ее работоспособного состояния – $p(Q)$, по нему определяются основные показатели ее надежности, в том числе вероятность удовлетворения спроса потребителей топливом или бездефицитного снабжения потребителей, а также математическое ожидание (м.о.) и среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) фактической производительности. Зная их, можно анализировать надежность совместного функционирования составляющих энергоснабжающей системы. Это можно сделать двумя способами.

Способ 1. Эталонный расчет предполагает перемножение исходного ряда распределения работоспособного состояния генерирующего оборудования электрических станций, работающих на определенном виде топлива, на соответствующий ему ряд $p(Q)$.

Способ 2. Используется вероятность обеспечения топливом (коэффициент снабжения) p^T . Вероятность работоспособного состояния генерирующей мощности $p^Г$ электростанции пересчитывается по формуле:

$$p^{ГТ} = p^Г \cdot p^T.$$

И на ее основе строится скорректированный исходный ряд распределения генерации электроэнергии для анализа надежности узла ЭЭС с учетом надежности ТСС, т.е. в дальнейших расчетах надежности ЭЭС применяются скорректированные значения.

Сравнение результатов расчетов по «узловому» методу проводилось на упрощенном тестовом примере, но с учетом всех существенных факторов, влияющих на интегральную надежность электроснабжения потребителей.

⁵ Чельцов М. Б., Воропай Н. И., Илькевич Н. И., Ковалев Г. Ф., Савельев В. А., Славин Г. Б. [и др.]. Надежность систем энергетики: сборник рекомендуемых терминов. М.: ИАЦ «Энергия», 2007. 192 с.

Для расчета рядов распределения случайных состояний систем топливоснабжения и электроснабжения использовалась схема независимых испытаний на основе формулы Бернулли [20]:

$$P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m}; \quad C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!};$$

$$0! = 1; n = 1 \times 2 \dots n, \quad (1)$$

где $q = 1 - p; m = 0, 1, 2, \dots, n$; $P_n(m)$ – вероятность того, что из n агрегатов m находится в работоспособном состоянии с соответствующей суммарной мощностью $\sum_{i=0}^m P_i$; p, q – вероятности работоспособного и неработоспособного состояний каждого из n агрегатов; $p + q = 1$; P_i – единичная мощность агрегата.

Данные ряды распределения могут быть также представлены и в результате обработки статистических (отчетных) данных функционирования соответствующего оборудования.

Рассмотрим предлагаемую методику на примерах.

Способ 1. Имеется система топливоснабжения, представленная десятью объектами с производительностью 100 МВт каждый и вероятностью работоспособного состояния 0,9 каждого объекта, т.е. $P^T = 100$, $n = 10$, $p^T = 0,9$, $q^T = 0,1$. По формуле Бернулли (1) рассчитан ряд распределения вероятностей случайных состояний системы топливоснабжения – P_i^T . При этом математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение фактической производительности ТСС, соответственно, равны:

$$M[P^T] = 852,32 \text{ МВт}; \dots \sigma[P^T] = 300,92 \text{ МВт}.$$

Таблица 1. Ряд распределения вероятностей нагрузки
Table 1. Load probability distribution series

№ п/п Показатели	1	2	3	4	5	6	7	8
P_i^H , МВт	100	200	300	400	500	600	700	800
p_i^H	0,105	0,110	0,115	0,120	0,125	0,130	0,145	0,15

Примечание. Условие нормировки выполняется: $\sum p_i = 1, 0$.

По данным располагаемой мощности электрических станций, состоящих из девяти агрегатов мощностью 100 МВт и с вероятностью работоспособного состояния 0,85, т.е.

$P^T = 100$, $n = 9$, $p^T = 0,85$, $q^T = 0,15$, рассчитан ряд распределения вероятностей располагаемой мощности ЭС, при этом м.о. и с.к.о., соответственно, равны:

$$M[P^T] = 765,005 \text{ МВт}; \quad \sigma[P^T] = 106,94 \text{ МВт}.$$

Ряд распределения нагрузки, требующей покрытия, считается заданным и представлен в табл. 1.

При этом м.о. и с.к.о. нагрузки, соответственно, равны:

$$M[P^H] = 477 \text{ МВт}. \quad \sigma[P^H] = 229,28 \text{ МВт}.$$

Схема соединения системы топливоснабжения, электроэнергетической системы и нагрузки (Н) в плане надежности является последовательной: ТСС → ЭЭС → Н.

Обычно проблема определения надежности электроснабжения решается для однозначно заданной производительности каждой из систем, входящих в схему (ТСС, ЭЭС, Н), и вероятности обеспеченности этой производительности. Здесь же рассматривается ряд распределения различных производительностей и соответствующих им вероятностей, что более соответствует реальным условиям функционирования систем. Потому что, таким образом, учитываются частичные отказы системы электроснабжения и неполное покрытие нагрузки.

Располагаемая мощность ТСС принимается больше располагаемой мощности ЭЭС, а мощность ЭЭС больше максимальной мощности нагрузки с учетом необходимости резервирования ($1000 > 900 > 800$).

С учетом схемы соединения следует получить обобщенный ряд распределения располагаемой мощности ТСС и ЭЭС и умножить его на ряд распределения нагрузки. И по результирующему ряду распределения можно определить показатели надежности энергоснабжения исследуемой схемы.

Обобщенный ряд распределения характеризует возможности совместной работы систем топливо- и электроснабжения с учетом собственной надежности их функционирования.

Для формирования обобщенного ряда распределения требуется привлечение технологического анализа исследуемого сложного объекта. Естественно, что выходным и в данном смысле основным звеном является ЭЭС. Поэтому при осуществлении композиции (перемножении) рядов распределения производительностей ТСС и ЭЭС обобщенные значения производительности берутся из соотношения $P^O = \min(P^T, P^Г)$, т.е. выбираются минимальные значения в соответствии со схемой соединения.

По результатам этого анализа и формируется окончательный обобщенный ряд.

Композиция обобщенного ряда распределения вероятностей производительностей совместного функционирования систем топливо- и электроснабжения с рядом распределения нагрузки (см. табл. 1) дает результирующий ряд распределения вероятностей покрытия этой нагрузки (табл. 2), позволяющий получить точные (эталонные) показатели надежности. Значения производительности, идущей на покрытие нагрузки, определяются в соответствии с технологическими особенностями системы из соотношения: $P^П = \min(P^O, P^Н)$. Вероятности каждого из случайных состояний покрытия нагрузки показывают степень обеспеченности этой нагрузки энергоснабжающей ее системой.

Из табл. 2 следует, что покрытие переменной нагрузки осуществляется с вероятностью 0,9081549 равной сумме вероятностей покрытия всех значений нагрузки. И, следовательно, отказ в покрытии будет происходить с вероятностью

$$p_1^П = 0,0918 = 1,0 - 0,9082. \quad (2)$$

Способ 2. Ниже приводится расчет с использованием коэффициента снабжения топливом p^T каждого генератора системы и вероятности работоспособного состояния $p^Г$ со значениями, принятыми в предыдущем расчете ($p^T = 0,9$; $p^Г = 0,85$). Принимаем, что с учетом обеспеченности генерирующих блоков топливом вероятность их работоспособного состояния имеет значение

$$p^{ГТ} = p^Г \cdot p^T = 0,9 \cdot 0,85 = 0,765.$$

Для расчета ряда распределения случайных значений располагаемой генерирующей мощности использовалась формула Бернулли (1).

Композиция этого ряда с рядом нагрузки (см. табл. 1) дает результирующий ряд распределения покрытия нагрузки, табл. 3. Из табл. 3 следует, что покрытие нагрузки осуществляется с вероятностью 0,9999989 равной сумме вероятностей покрытия всех отличных от нуля значений нагрузки. И, следовательно, отказ в покрытии будет происходить с вероятностью

$$p_1^П = 0,0000021 = 1,0 - 0,9999989. \quad (3)$$

Сравнивая результаты, полученные на основе данных табл. 2 (эталонный ряд распределения, выражение (2)) и табл. 3 (ряд распределения на основе коэффициента снабжения топливом, выражение (3)), следует сделать вывод, что имеет место существенная погрешность при использовании данной методики. Следовательно, эту методику вряд ли целесообразно рекомендовать, несмотря на упрощение расчетов.

Еще менее точные результаты будут получены, если вместо рядов распределения состояний ТСС, ЭЭС и нагрузки используются математические ожидания производительностей:

$$M[P^T] = 852,32 \text{ МВт}; \quad M[P^Г] = 765,055 \text{ МВт}; \quad M[P^Н] = 477 \text{ МВт}.$$

Таблица 2. Ряд распределения вероятностей покрытия нагрузки
Table 2. Load coverage probability distribution series

Показатели \ № п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_i^{Π} , МВт	0	100	200	300	400	500	600	700	800
p_i^{Π}	0,0918	0,1050	0,1100	0,1150	0,1200	0,1243	0,1255	0,1239	0,0845

Примечание. Условие нормировки выполняется: $\sum p_i = 1, 0$.

Таблица 3. Ряд распределения вероятностей покрытия нагрузки с учетом табл. 6
Table 3. Distribution series of load coverage probabilities taking into account table 6

Показатели \ № п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_i^{Π} , МВт	0	100	200	300	400	500	600	700	800
p_i^{Π}	$0,21 \cdot 10^{-5}$	0,1050	0,1106	0,1191	0,1361	0,1630	0,1764	0,1389	0,0507

Примечание. Условие нормировки выполняется: $\sum p_i = 1, 0$.

Из приведенных математических ожиданий можно заключить, что энергоснабжение нагрузки будет осуществляться абсолютно надежно, с вероятностью 1,0. Данное предположение не подтвердилось. Даже для нашего тестового примера полученные значения с.к.о. дают такой разброс случайных величин, что при их экстремальных (конечных) значениях энергоснабжение нагрузки будет осуществляться ненадежно.

На основании выполненного исследования можно сделать вывод, что для расчетов надежности покрытия нагрузки энергетических систем следует выполнять расчеты, отталкиваясь от технологических особенностей рассматриваемых систем, структурной схемы их соединений, при этом избегая (для целей сокращения объемов расчетов) различных приемов необоснованного упрощения исходной схемы, ее параметров и методик вычисления.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

В случае «системного» подхода при расчете надежности узлов ЭЭС учитывается надежность ТСС, рассчитанная для ТСС в целом. То есть сначала оценивается надежность топливоснабжающей системы: вычисляются вероятности бездефицитного снабжения потребителей топливом, тем самым

оценивается надежность его поставки на электрические станции, работающие на данном виде топлива.

Учет надежности работы ТСС при анализе надежности электроснабжения потребителей в ЭЭС можно осуществить двумя способами:

Способ 1. Корректировка аварийности генерирующего оборудования [4, 6]. Вычисленные показатели надежности топливоснабжения потребителей по узлам i , а именно: вероятности бездефицитного снабжения потребителей топливом p_i^T учитываются до вычисления рядов распределения генерирующей мощности. Сначала пересчитываются аварийности генерирующего оборудования электрических станций данного узла i , работающих на данном виде топлива. Для этого вычисляются вероятности безотказной работы оборудования электрических станций, работающих на данном виде топлива, $p_i^{\Gamma} = 1 - q_i^{\Gamma}$, которые затем умножаются на соответствующие поузловые показатели надежности ТСС p_i^T , т.е. $p' = p_i^{\Gamma} \cdot p_i^T$. Далее вычисляются скорректированные аварийности оборудования электрических станций: $q' = 1 - p'$. И на их основе вычисляются ряды распределения генерирующей мощности или работоспособного состояния агрегатов на ЭС.

Способ 2. Корректировка рядов распределения генерирующей мощности. Вычисленные показатели надежности топливоснабжения потребителей по узлам i , а именно: вероятности бездефицитного снабжения потребителей топливом p_i^T учитываются после вычисления рядов распределения генерирующей мощности или работоспособного состояния агрегатов на электрических станциях путем умножения вычисленных рядов на соответствующий ряд $(1 - p_i^T; p_i^T)$.

В результате этих двух способов получают исходные данные для математической модели оценки надежности ЭЭС с учетом надежности снабжения этих электростанций топливом.

Сравнение способов учета надежности ТСС при «системном» подходе проводилось на условном примере: ЭС содержит 5 агрегатов ($n = 5$), каждый мощностью 800 МВт с одинаковой аварийностью $q^T = 0,03$. Вероятность бездефицитной работы ТСС равна $p^T = 0,9$.

Согласно 1-му способу корректировки аварийности генерирующего оборудования, пересчитывается аварийность генерирующего оборудования ЭС с учетом надежности работы ТСС. Для этого вычисляем исходную и скорректированную вероятности безотказной работы:

$$p^T = 1 - q^T = 1 - 0,03 = 0,97;$$

$$p' = p^T \cdot p^T = 0,97 \cdot 0,9 = 0,873.$$

Скорректированная аварийность оборудования будет рассчитана:

$$q' = 1 - p' = 1 - 0,873 = 0,127.$$

Рассчитаем новый ряд распределения работоспособного состояния ЭС со скорректированной аварийностью оборудования с помощью формулы Бернулли. Полученный ряд распределения работоспособного состояния генерирующего оборудования с учетом вероятности бездефицитной работы ТСС представлен в табл. 4.

При этом м.о. и с.к.о. фактической производительности равны $M[P^1] = 3492$ МВт и $\sigma[P^1] = 596,64$ МВт, соответственно.

Согласно 2-му способу корректировки рядов распределения генерирующей мощности, рассчитывается ряд распределения работоспособного состояния ЭС на основе схемы независимых испытаний с помощью формулы Бернулли при $n = 5, q = 0,03, p = 1 - q = 0,97, m = 0,1,2,\dots,5$.

Для учета влияния работы ТСС на надежность ЭС полученный ряд распределения умножаем на соответствующий ряд $(1 - p^T, p^T) = (0,1; 0,9)$ и вычисляем ряд распределения работоспособного состояния генерирующего оборудования с учетом вероятности бездефицитной работы ТСС. Результаты представлены в табл. 5. При этом м.о. и с.к.о. фактической производительности равны $M[P^2] = 3492$ МВт и $\sigma[P^2] = 1199,46$ МВт, соответственно.

Таблица 4. Ряд распределения вероятностей работоспособного состояния генерирующего оборудования с учетом работы топливоснабжающей системы, способ 1А

Table 4. Probability distribution series of the operational state of generating equipment taking into account the fuel supply system operation, method 1A

Показатели \ № п/п	1	2	3	4	5	6
Количество агрегатов в работе	0	1	2	3	4	5
Мощность, МВт	0	800	1600	2400	3200	4000
Вероятность, p_i^1	$0,3304 \cdot 10^{-4}$	$0,1136 \cdot 10^{-2}$	$0,1561 \cdot 10^{-1}$	0,1073	0,3688	0,5071

Примечание. Условие нормировки выполняется: $\sum p_i = 1,0$.

Таблица 5. Ряд распределения вероятностей работоспособного состояния генерирующего оборудования с учетом работы топливоснабжающей системы, способ 2

Table 5. Probability distribution series of the operational state of generating equipment taking into account the fuel supply system operation, method 2

Показатели \ № п/п	1	2	3	4	5	6
Количество агрегатов в работе	0	1	2	3	4	5
Мощность, МВт	0	800	1600	2400	3200	4000
Вероятность, p_i^2	0,1	$0,3536 \cdot 10^{-5}$	$0,2286 \cdot 10^{-3}$	$0,7393 \cdot 10^{-2}$	0,1195	0,7729

Примечание. Условие нормировки выполняется: $\sum p_i = 1, 0$.

Сравнивая результаты расчетов двух способов учета надежности ТСС для оценки балансовой надежности ЭЭС (см. табл. 4 и 5), можно видеть, что первый способ, более точно учитывающий специфику систем, показывает меньшую надежность, чем второй, упрощенный способ. М.о. производительностей равны, с.к.о. в первом случае меньше, что говорит о большей однородности данных. Можно заключить, что первый способ, учитывающий технологию процесса, является более предпочтительным.

ОЦЕНОЧНЫЙ МЕТОД

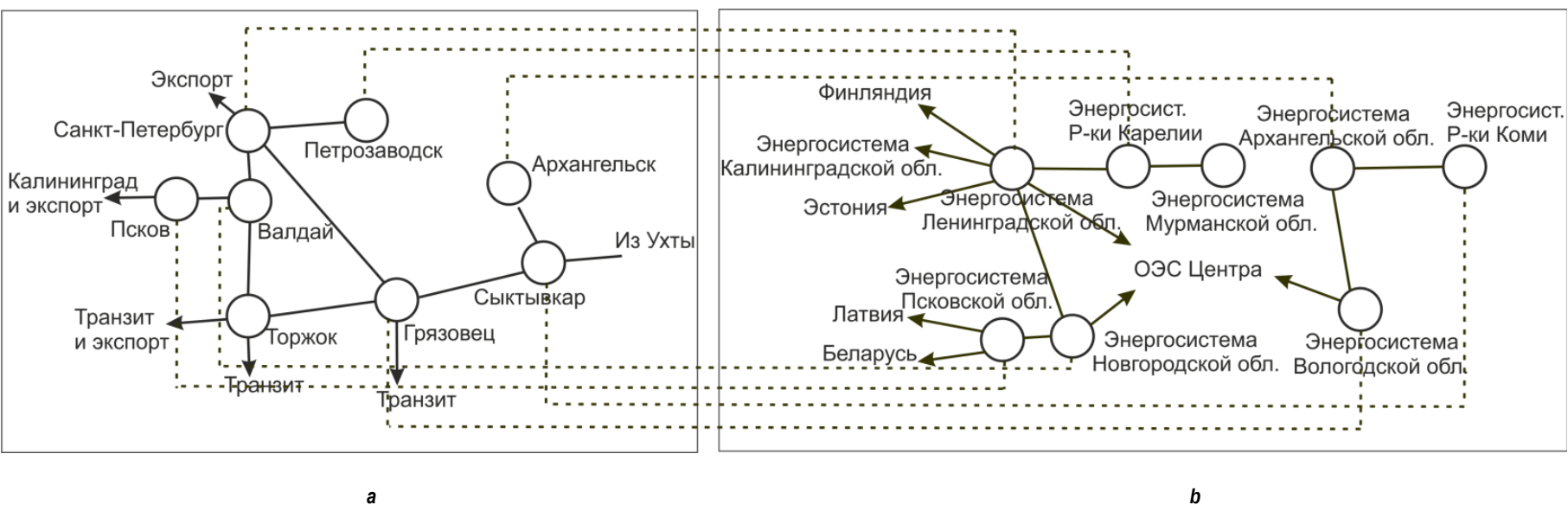
Для оценки интервала поузловых показателей надежности ЭЭС, а именно – нижней и верхней границ вероятности бездефицитного снабжения потребителей электроэнергией, сначала производится анализ надежности ТСС. В результате вычисляются показатели надежности топливоснабжения потребителей по всем узлам i , а именно: вероятности бездефицитного снабжения потребителей топливом p_i^T ; $i = \overline{1, I}$, где I – число расчетных узлов-потребителей в системе. Аналогично можно вычислить поузловые показатели надежности ЭЭС – вероятности бездефицитного снабжения потребителей электроэнергией при абсолютной надежности ТСС (или без учета ненадежной работы ТСС) – p_i^T . Тогда вероятность электроснабжения потребителей с учетом надежности ТСС p_i^{TT} рассчитывается как $p_i^{TT} = p_i^T p_i^T = \mathcal{P}_i'$. Эту величину

можно рассматривать как нижнюю границу $\mathcal{P}_i'$ поузлового показателя надежности электроснабжения потребителей p_i^{TT} . На самом деле поузловые показатели надежности ЭЭС с учетом работы ТСС будут выше нижней границы за счет проявления системного эффекта взаимопомощи внутри ЭЭС. Верхняя граница поузлового показателя будет при $p_i^T = 1$, т.е. считаем, что система топливоснабжения абсолютно надежна или ее надежность не учитывается при анализе надежности ЭЭС, $p_i^T = 1$ $p_i^T = \mathcal{P}_i''$. Очевидно, что вероятность электроснабжения потребителей с учетом надежности ТСС будет находиться в диапазоне от нижней границы $\mathcal{P}_i'$ до верхней $\mathcal{P}_i''$, т.е. $\mathcal{P}_i' \leq p_i^{TT} \leq \mathcal{P}_i''$.

Исследования по апробации интервальной оценки поузловых показателей надежности ЭЭС проводились для энергосистемы СЗФО [5, 6]. В качестве топливоснабжающей системы рассматривается газоснабжающая система. Энергосистема СЗФО была выбрана потому, что доля генерирующей мощности энергосистемы СЗФО, использующая газ в качестве первичного энергоресурса, составляет около 70% от суммарной генерирующей мощности⁵.

На рисунке представлены расчетные схемы системы газоснабжения и энергосистемы СЗФО, пунктирной линией отмечены функциональные связи данных систем [5].

⁵Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2014–2020 годы. Приказ № 495 от 01.08.2014. М., Минэнерго России.



Расчетные схемы газоснабжающей системы (а) и электроэнергетической системы (б) Северо-Западного федерального округа с функциональными связями
Design diagrams of the gas supply system (a) and the electric power system (b) of the North-Western Federal District with functional connections

Для оценки надежности ГСС и ЭЭС использовались математические модели анализа надежности соответствующих систем, разработанные авторами [16, 17]. В результате оценки надежности ГСС СЗФО были получены показатели надежности газоснабжения потребителей по узлам – вероятности удовлетворения спроса потребителей газом или бездефицитного снабжения потребителей газом $p_i^{\text{ГСС}}$ [5, 6], представленные в табл. 6, столб. 1 и 2.

Также была оценена надежность электроэнергетической системы СЗФО как без учета надежности снабжения электростанций газом, так и с учетом надежности газоснабжения электростанций, а именно: вычислены вероятности бездефицитного снабжения потребителей электроэнергией ($p_i^{\text{ЭЭС}}$) по узлам [5, 6]. Результаты расчетов приведены в табл. 6, столб. 3, 4 и 6.

Для расчета нижней границы поузловых показателей надежности электроснабжения потребителей СЗФО были совмещены узлы ГСС и ЭЭС (см. рисунок и табл. 6). Так, например, нижняя граница для узла ЭЭС Республика Карелия (что соответствует узлу в схеме ГСС – Петрозаводск) была получена как $p_i' = p_i^{\text{ГСС}} \cdot p_i^{\text{ЭЭС}} = 0,9352 \cdot 0,9929 = 0,9285$ (см. столбец 5 табл. 6).

Анализ результатов расчета подтверждает теоретическое предположение, что вероятность электроснабжения потребителей с учетом надежности ГСС, рассчитанная как $\Phi_i' = p_i^{\text{ГСС}} \cdot p_i^{\text{ЭЭС}}$, является нижней границей поузлового показателя надежности электроснабжения потребителей (см. столбец 5 табл. 6).

Позуловые показатели надежности ЭЭС с учетом работы ГСС, рассчитанные в соответствии с «системным» подходом (см. столбец 6 табл. 6), оказались выше нижней границы за счет проявления системного эффекта взаимопомощи при функционировании ЭЭС.

«Узловой» и «системный» подходы рассчитывают надежность ЭЭС на основе точечного или дискретного показателя надежности, получаемого в виде одного конкретно-

го числа, что может приводить к ошибкам при принятии решения. «Оценочный» подход дает интервальную оценку показателя, которая является более объективной и сводит к минимуму ошибки при расчетах.

В практическом плане применения предлагаемых методов анализа надежности топливоснабжения электрических станций можно заключить, что каждый последующий подход (поузловой, системный, оценочный) предоставляет улучшенные оценки по учету надежности топливоснабжения электрических станций. Поэтому их применение может быть обосновано горизонтом планирования работы энергосистем и неопределенностью исходной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Вопросы обеспечения надежности энергоснабжения потребителей в современных условиях эксплуатации энергосистем становятся все более актуальными. Одним из основных факторов, наряду с высоким износом оборудования во многих системах энергетики, является вопрос обеспеченности их всеми видами ресурсов. В частности, при комплексном исследовании [21] надежности ЭЭС актуальным является обеспеченность их первичными энергоресурсами – топливом для тепловых электростанций: газ, уголь, мазут и др.

2. Предложено несколько методических подходов – «поузловой», «системный» и «оценочный» – для оценки надежности электроэнергетических систем с учетом надежности топливоснабжения. Эти подходы позволяют с разной степенью точности провести учет надежности топливоснабжения при оценке надежности электроснабжения при планировании работы и прогнозировании развития энергосистем.

3. Все подходы апробированы на примерах: «поузловой» и «системный» – на условном примере энергосистемы, а «оценочный» – на расчетных схемах системы газоснабжения и энергосистемы СЗФО.

4. Сравнивая различные подходы к оценке надежности ЭЭС с учетом надежности ГСС, можно видеть, что:

1) при «узловом» подходе 1-й способ с

использованием рядов распределения вероятностей располагаемых мощностей и нагрузки дает более точные результаты по сравнению со 2-м упрощенным способом с использованием коэффициента снабжения;

2) «системный» подход удобен, когда оценивается надежность узлов всей ТСС, при этом 1-й способ (корректировка аварийности генерирующего оборудования) дает более точные результаты по сравнению со 2-м способом (корректировка рядов распределения генерирующего оборудования);

3) «оценочный» подход позволяет получить интервальную оценку такого показателя надежности, как вероятность бездефицитного снабжения потребителей электроэнергии всех узлов ЭЭС.

5. Каждый последующий из предложен-

ных подходов к учету надежности ТСС при оценке надежности ЭЭС улучшает предыдущий. «Поузловой» подход позволяет оценить надежность ЭЭС в первом приближении и дает наиболее грубые оценки, он может быть использован при долгосрочном планировании развития ЭЭС. «Системный» подход позволяет оценить надежность ЭЭС с учетом надежности ТСС более комплексно по сравнению с предыдущим за счет своего системного эффекта. «Оценочный» подход в отличие от двух первых подходов, где вычисляются точечные или дискретные показатели надежности, дает интервальную оценку, которую возможно и целесообразно использовать при решении задач не только перспективного развития, но долгосрочного планирования работы ЭЭС.

Таблица 6. Показатели надежности электроэнергетической системы Северо-Западного федерального округа
Table 6. Reliability indicators of the electric power system of the North-Western Federal District

№	Название узлов в системах			Вероятности бездефицитного снабжения потребителей электроэнергии, $P_i^{\text{ЭЭС}}$		
	ГСС	Вероятность бездефицитного газоснабжения потребителей, $P_i^{\text{ГСС}}$	ЭЭС	без учета надежности ГСС $P_i'' = P_i^{\text{ЭЭС}}$; ($P_i^{\text{ГСС}} = 1$) (верхняя граница)	с учетом надежности ГСС («поузловой» подход) $P_i' = P_i^{\text{ГСС}} \cdot P_i^{\text{ЭЭС}}$ (нижняя граница)	с учетом надежности ГСС («системный» подход)
1	2	3	4	5	6	
1	Петрозаводск	0,9352	ЭЭС Республики Карелия	0,9929	0,9285	0,9876
2	Сыктывкар	0,9971	ЭЭС Республики Коми	0,9990	0,9961	0,9990
3	Архангельск	0,9971	ЭЭС Архангельской обл.	0,9999	0,9970	0,9999
4	Грязовец	0,9950	ЭЭС Вологодской обл.	0,9999	0,9950	0,9999
5	Санкт-Петербург	0,9692	ЭЭС Ленинградской обл.	0,9999	0,9692	0,9999
6	Валдай	0,9950	ЭЭС Новгородской обл.	0,9999	0,9949	0,9999
7	Псков	0,9773	ЭЭС Псковской обл.	0,9986	0,9759	0,9973
8	Торжок	0,9950	ЭЭС Мурманской обл.*	0,9978	0,9978	0,9978

Примечания: ГСС – газоснабжающая система; ЭЭС – электроэнергетическая система.

*Нет связи с ГСС.

Список источников

1. Баринов В. А., Барон Ю. Л., Батенин В. М., Безруких П. П., Бушуев В. В., Волков Э. П. [и др.]. Энергетика России: взгляд в будущее. Обосновывающие материалы к Энергетической стратегии России на период до 2030 года. М., 2010. [Электронный ресурс]. URL:

http://www.energystategy.ru/editions/demo/demo_ES-2030_2011.pdf (11.09.2021).

2. Бушуев В. В., Мастепанов А. М., Куричев Н. К., Белогорьев А. М., Громов А. И. Мировая энергетика–2050 (Белая книга) / под ред. В. В. Бушуева, В. А. Ка-

ламанова. М.: ИД «Энергия», 2011. 360 с.

3. Федун Л., Сонин Ф. Перспективы развития мировой и российской энергетики: сценарии до 2050 года // Энергетическая политика. 2022. <https://energypolicy.ru/perspektivy-razvitiya-mirovoj-i-rossijskoj-energetiki-scenarii-do-2050-goda/neft/2022/13/18/> (11.09.2021).
4. Ковалёв Г. Ф., Крупенёв Д. С., Дзюбина Т. В. Комплексный подход к оценке балансовой надежности электроэнергетических систем с учетом надежного снабжения электростанций газом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 9. С. 140–145.
5. Ковалёв Г. Ф., Крупенёв Д. С., Дзюбина Т. В. Взаимосвязь между снабжением электростанций газом и надежным функционированием электроэнергетической системы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 10. С. 195–200.
6. Krupenev D. S., Kovalev G. F., Dzyubina T. V. Assessment of electric power system adequacy considering reliability of gas supply to power plants // Energy Systems Research. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 21–28. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.01.0002>.
7. An Seungwon, Qing Li, Gedra T. W. Natural gas and electricity optimal power flow // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (Dallas, 7–12 September 2003). Dallas: IEEE, 2003. Vol. 1. P. 138–143. <https://doi.org/10.1109/TDC.2003.1335171>.
8. Liu Cong, Shahidehpou M., Wang Jianhui. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow // Chaos. 2011. Vol. 21. P. 025102. <https://doi.org/10.1063/1.3600761>.
9. Chaudry M., Jenkins N., Strbac G. Multi-time period combined gas and electricity network optimization // Electric Power Systems Research. 2008. Vol. 78. Iss. 7. P. 1265–1279. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.11.002>.
10. Clegg S., Mancarella P. Integrated electrical and gas network modeling for assessment of different power-and-heat options // Power Systems Computation Conference. 2014. <https://doi.org/10.1109/PSCC.2014.7038405>.
11. Arnold M., Negenborn R. R., Andersson G., De Schutter B. Distributed control applied to combined electricity and natural gas infrastructures // First International Conference on Infrastructure Systems and Services: Building

Networks for a Brighter Future. 2008. <https://doi.org/10.1109/INFRA.2008.5439653>.

12. Zhang Yao, Hu Yuan, Ma Jin, Bie Zhaohong. A mixed-integer linear programming approach to security-constrained cooptimization expansion planning of natural gas and electricity transmission systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33. Iss. 6. P. 6369–6378. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2832192>.
13. Zhong Junjie, Li Yong, Cao Yijia, Sidorov D., Panasetsky D. A uniform fault identification and positioning method of integrated energy system // Energy Systems Research. 2018. Vol. 1. No. 3. P. 14–24. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0002>.
14. Voropai N., Stennikov V., Senderov S., Barakhtenko E., Voitov O., Ustinov A. Modeling of integrated energy supply systems: main principles, model, and applications // Journal of Energy Engineering. 2017. Vol. 143. Iss. 5. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000443](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000443).
15. Correa-Posada C. M., Sanchez-Martin P. Security-constrained optimal power and natural-gas flow // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29. Iss. 4. P. 1780–1787. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2299714>.
16. Илькевич Н. И., Дзюбина Т. В., Калинина Ж. В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения. Новосибирск: Наука, 2014. 217 с.
17. Ковалёв Г. Ф., Лебедева Л. М. Надежность систем электроэнергетики / отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2015. 224 с.
18. Гуринович В. Д., Дзюбина Т. В., Добровольская Т. В., Домышев А. В., Дьяков А. Ф., Илькевич Н. И. Надежность систем энергетики: проблемы, модели и методы их решения. Новосибирск: Наука, 2014. 284 с.
19. Baker J., Brunner H., Sinclair J., Uhlen K. ENARD: International collaboration in electricity networks R&D // 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. 2009. Part 1. <https://doi.org/10.1049/cp.2009.0644>.
20. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 4-е изд., стер. М.: Изд-во «Наука», 1969. 564 с.
21. Воропай Н. И. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.

References

1. Barinov V. A., Baron Yu. L., Batenin V. M., Bezrukih P. P., Bushuev V. V., Volkov E. P., et al. Russian energy sector: a look into the future. Substantiating materials for the Energy Strategy of Russia for the period up to 2030. Moscow, 2010. Available from: http://www.energystrategy.ru/editions/demo/demo_ES-2030_2011.pdf [Accessed 11th September 2021]. (In Russ.).
2. Bushuev V. V., Mastepanov A. M., Kurichev N. K., Belogor'ev A. M., Gromov A. I. *World Energy–2050 (White Book)* / eds. V. V. Bushueva, V. A. Kalamanova. Moscow: Energiya; 2011, 360 p. (In Russ.).
3. Fedun L., Sonin F. Development prospects of global and Russian energy sector: scenarios for the period up to

2050. *Energeticheskaya politika*. 2022. <https://energypolicy.ru/perspektivy-razvitiya-mirovoj-i-rossijskoj-energetiki-scenarii-do-2050-goda/neft/2022/13/18/> [Accessed 11th September 2021]. (In Russ.).
4. Kovalyov G. F., Krupenyov D. S., Dzyubina T. V. An integrated approach to electric power system adequacy assessment in terms of reliable gas supply to power plants. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;9:140–145. (In Russ.).
5. Kovalyov G. F., Krupenev D. S., Dzyubina T. V. Interrelation between power plant gas supply and reliable electric power system operation. *Vestnik Irkutskogo gosudar-*

stvennogo tekhnicheskogo universiteta = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;10:195-200. (In Russ.).

6. Krupenev D. S., Kovalev G. F., Dzyubina T. V. Assessment of electric power system adequacy considering reliability of gas supply to power plants. *Energy Systems Research*. 2018;1(1):21-28. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.01.0002>.

7. An Seungwon, Qing Li, Gedra T. W. Natural gas and electricity optimal power flow. In: *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 7–12 September 2003, Dallas. Dallas: IEEE; 2003, vol. 1, p. 138-143. <https://doi.org/10.1109/TDC.2003.1335171>.

8. Liu Cong, Shahidehpou M., Wang Jianhui. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow. *Chaos*. 2011;21:025102. <https://doi.org/10.1063/1.3600761>.

9. Chaudry M., Jenkins N., Strbac G. Multi-time period combined gas and electricity net-work optimization. *Electric Power Systems Research*. 2008;78(7):1265-1279. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.11.002>.

10. Clegg S., Mancarella P. Integrated electrical and gas network modeling for assessment of different power-and-heat options. In: *Power Systems Computation Conference*. 2014. <https://doi.org/10.1109/PSCC.2014.7038405>.

11. Arnold M., Negenborn R. R., Andersson G., De Schutter B. Distributed control applied to combined electricity and natural gas infrastructures. In: *First International Conference on Infrastructure Systems and Services: Building Networks for a Brighter Future*. 2008. <https://doi.org/10.1109/INFRA.2008.5439653>.

12. Zhang Yao, Hu Yuan, Ma Jin, Bie Zhaohong. A mixed-integer linear programming approach to security-constrained cooptimization expansion planning of natural gas and electricity transmission systems. In: *IEEE Trans-*

actions on Power Systems. 2018;33(6):6369-6378. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2832192>.

13. Zhong Junjie, Li Yong, Cao Yijia, Sidorov D., Panasetsky D. A uniform fault identification and positioning method of integrated energy system. *Energy Systems Research*. 2018;1(3):14-24. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.03.0002>.

14. Voropai N., Stennikov V., Senderov S., Barakhtenko E., Voitov O., Ustinov A. Modeling of integrated energy supply systems: main principles, model, and applications. *Journal of Energy Engineering*. 2017;143(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000443](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000443).

15. Correa-Posada C. M., Sanchez-Martin P. Security-constrained optimal power and natural-gas flow. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014;29(4):1780-1787. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2299714>.

16. Il'kevich N. I., Dzyubina T. V., Kalinina Zh. V. *Multi-level modeling of gas supply system development*. Novosibirsk: Nauka; 2014, 217 p. (In Russ.).

17. Kovalyov G. F., Lebedeva L. M. *Reliability of electric power systems* / ed. N. I. Voropaj. Novosibirsk: Nauka; 2015, 224 p. (In Russ.).

18. Gurinovich V. D., Dzyubina T. V., Dobrovol'skaya T. V., Domyshv A. V., D'yakov A. F., Il'kevich N. I. *Reliability of energy systems: Problems, models and methods for solving them*. Novosibirsk: Nauka; 2014, 284 p. (In Russ.).

19. Baker J., Brunner H., Sinclair J., Uhlen K. ENARD: International collaboration in electricity networks R&D. In: *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. 2009;1. <https://doi.org/10.1049/cp.2009.0644>.

20. Ventcel' E. S. *Probability Theory*. Moscow: Nauka; 1969, 564 p. (In Russ.).

21. Voropaj N. I. *Systemic research in the energy sector: a retrospective of the research areas of SEI – ISEM*. Novosibirsk: Nauka; 2010, 686 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дзюбина Татьяна Владимировна,

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник Отдела
трубопроводных систем энергетики,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Ковалёв Геннадий Федорович,

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Крупенёв Дмитрий Сергеевич,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий Лабораторией надежности
топливо- и энергоснабжения,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana V. Dzyubina,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Department
of Pipeline Energy Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Gennady F. Kovalev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Dmitry S. Krupenev,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Head of the Laboratory of Fuel and Energy Supply Reliability,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 26.01.2022; одобрена после рецензирования 14.03.2022; принята к публикации 17.06.2022.

Information about the article

The article was submitted 26.01.2022; approved after reviewing 14.03.2022; accepted for publication 17.06.2022.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 66.021.3/4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-260-269>

Определение коэффициентов теплоотдачи в мультивихревом тепломассообменном устройстве

Андрей Владимирович Дмитриев^{1✉}, Ильнур Наилович Мадышев²,
Альбина Талгатовна Галимова³, Нурислам Фаритович Сахибгареев⁴,
Гузель Рамилевна Бадретдинова⁵

^{1,4,5} Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

^{2,3} Нижнекамский химико-технологический институт, филиал Казанского национального исследовательского технологического университета, г. Нижнекамск, Россия

¹ieremiada@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>

²ilnyr_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

³galimovaat@nchti.ru

⁴fanat.elvisa@gmail.com

⁵nice.badretdinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>

Резюме. Целью данной работы является определение коэффициентов теплоотдачи от рабочих поверхностей разработанного авторами мультивихревого тепломассообменного устройства, а также получение критериальных зависимостей для расчета коэффициентов теплоотдачи от внутренней стенки корпуса и дна при создании вихрей в предложенном аппарате. Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent. При решении задачи определения профиля скорости текучей среды, для расчета коэффициента теплоотдачи, использовалась модель турбулентности SST k- ω , показывающая удовлетворительную сходимость в пристеночных областях течения жидких и газовых сред при моделировании течений в аналогичных конструкциях, используемых, например, для классификации мелкодисперсного сыпучего материала. Получены безразмерные зависимости, позволяющие связывать число Нуссельта с числами Рейнольдса и Прандтля. Получены зависимости увеличения интенсивности теплоотдачи от числа Рейнольдса. Установлено, что интенсивность теплоотдачи от внутренней стенки мультивихревого устройства превышает теплоотдачу от дна на 12,7–15,8% в зависимости от чисел Рейнольдса. Значения коэффициентов теплоотдачи на внутренней стенке предлагаемого устройства могут достигать 14747 Вт/(м²·К) при средней скорости течения жидкости равной 1 м/с. Предлагаемое мультивихревое тепломассообменное устройство обеспечивает формирование закрученного газового или жидкостного течения в кольцевом зазоре между патрубком и корпусом устройства, что обеспечивает высокие коэффициенты теплоотдачи и, следовательно, высокую интенсивность теплопередачи, особенно через стенку контактной ступени. Проведенные численные исследования показывают возможности достижения высоких значений удельного теплового потока через стенку контактной ступени, что позволяет наиболее эффективно использовать его в процессах, связанных с дополнительным подводом или отводом тепла из контактной ступени через внешнюю поверхность устройства.

Ключевые слова: мультивихревое устройство, тепломассообмен, коэффициент теплоотдачи, численное моделирование, критериальные уравнения

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-79-00001, <https://rscf.ru/project/21-79-00001/>.

Для цитирования: Дмитриев А. В., Мадышев И. Н., Галимова А. Т., Сахибгареев Н. Ф., Бадретдинова Г. Р. Определение коэффициентов теплоотдачи в мультивихревом тепломассообменном устройстве // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 260–269. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-260-269>.

Determination of heat-transfer coefficients in multi-vortex heat-mass-exchange apparatus

Andrey V. Dmitriev^{1✉}, Ilnur N. Madyshev², Albina T. Galimova³,
Nurislam F. Sakhibgareev⁴, Guzel R. Badretdinova⁵

^{1,4,5} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

^{2,3} Nizhnekamsk Chemical Technology Institute, Branch of Kazan National Research Technological University,
Nizhnekamsk, Russia

¹jeremiada@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>

²ilnyr_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-894X>

³galimovaat@nchti.ru

⁴fanat.elvisa@gmail.com

⁵nice.badretdinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>

Abstract. In this work, heat transfer coefficients from the working surfaces of a multi-vortex heat-and-mass exchange apparatus developed by the authors are determined along with dimensionless equations for calculating the heat transfer coefficients from the inner wall of a housing and bottom when generating. Numerical modelling is carried out using the ANSYS Fluent software package. When determining the velocity profile of a fluid in order to calculate the coefficient of heat transfer, the SST k- ω turbulence model is used. This allows for an adequate convergence in near-wall fluid and gas flow areas when simulating flows in similar constructions used, for example, to classify finely dispersed bulk solids. Dimensionless equations are obtained that relate the Nusselt number to the Reynolds and Prandtl numbers. Relationships are obtained for the increase in the heat transfer intensity as a function of the Reynolds number. It is established that the intensity of heat transfer from the inner wall in the multi-vortex apparatus exceeds the heat transfer from the bottom by 12.7–15.8% depending on the Reynolds number. The values of heat transfer coefficients at the inner wall of the proposed apparatus can reach 14747 W/(m²·K) at an average fluid flow rate of 1 m/s. The proposed multi-vortex heat-exchange apparatus ensures swirling gas or fluid flow in the annular gap between the branch pipe and unit housing to provide high heat transfer coefficients and, hence, high intensity of heat transfer, especially through the wall of the contact stage. The numerical studies demonstrate the possibility of achieving high values of specific heat flux through the wall of the contact stage, which enables the most efficient use of the apparatus in the processes associated with the additional heat supply or removal from the contact stage through its external.

Keywords: multi vortex device, heat and mass transfer, heat transfer coefficient, numerical modeling, dimensionless equations

Acknowledgements: The work was performed with the support of the Russian Science Foundation grant No. 21-79-00001, <https://rscf.ru/project/21-79-00001/>.

For citation: Dmitriev A. V., Madyshev I. N., Galimova A. T., Sakhibgareev N. F., Badretdinova G. R. Determination of heat-transfer coefficients in multi-vortex heat-mass-exchange apparatus. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):260-269. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-260-269>.

ВВЕДЕНИЕ

Вихревые тепломассообменные аппараты имеют высокую производительность по газу и жидкости и вследствие этого востребованы в промышленности для осуществления процессов ректификации, абсорбции, аэрации, охлаждения сточных вод [1].

Первые исследования на возможность проведения в вихревом аппарате тепло- и массообменного процесса сделали Е. Шауфлер и Х. Ценнек в Федеративной Республике Германия в 1963 г. [2]. Возможность применения вихревых аппаратов для проведе-

ния тепломассообменных процессов обусловлена тем, что вихревые аппараты обладают управляемой в широких пределах активной гидродинамической характеристикой и структурой течения в рабочей камере.

Несмотря на то, что принципы конструирования аппаратов вихревого типа разработаны достаточно давно, широкое использование их в промышленности сдерживается недостаточной изученностью гидро- и аэродинамических закономерностей работы и отсутствием надежных и обоснованных методов расчета эффективности протекающих в

них процессов очистки газа [3–23].

В последние десятилетия в мире остро сказывается ограниченность энергетических и сырьевых ресурсов. Это ведет к необходимости использования новых, малоотходных и высокоэффективных технологических процессов с минимальными потерями, полной утилизацией тепла, очисткой сточных вод и газов. Их создание невозможно без наличия технологических устройств с высокими удельными показателями. С одной стороны, это позволяет добиться высокой производительности с помощью аппарата меньших размеров, что дает как прямое снижение энергозатрат, так и улучшение массогабаритных характеристик, а, следовательно, экономию материалов и энергии при производстве аппарата. С другой стороны, повышение удельной эффективности работы агрегатов выгодно технологически.

Для теплообменных аппаратов повышение удельной эффективности работы не может быть достигнуто за счет увеличения быстроходности как для движущихся механизмов. Поэтому для увеличения производительности необходимо применять принципиально новые конструкции. Из существующих аппаратов максимальную удельную эффективность имеют устройства с активными гидрогазодинамическими режимами. Анализ их использования на предприятиях страны показал, что по производственным характеристикам они заметно превосходят устройства других типов аналогичного назначения.

Важной особенностью вихревых устройств является сильная зависимость эффективности их работы от конструктивных и режимных параметров. В неудачно выбранной конструкции формально годного аппарата технологический процесс будет идти с минимальным КПД; удачно же сконструированный вихревой аппарат, работающий в оптимальных режимах, обеспечивает высокую эффективность процесса, увеличивает полноту его протекания, позволяет экономить ресурсы и понижает количество отходов, тем самым дополнительно обеспечивая

как прямую, так и косвенную защиту окружающей среды.

По этой причине важным условием использования вихревых устройств является определение оптимальных конструктивных и режимных характеристик работы аппаратов. Это невозможно без комплексного изучения проходящих там гидрогазодинамических процессов и тепломассообмена, поскольку только в таком случае возможно создать адекватную расчетную модель аппарата, провести ее анализ, выдвинуть рекомендации по усовершенствованию и разработать устройство с наилучшими характеристиками [4].

Таким образом, проектирование нового эффективного тепломассообменного оборудования и модернизация существующего даже на основе апробированных на практике методов интенсификации требуют проведения дополнительных экспериментальных исследований теплообмена и гидродинамики течения в каналах, а также разработки математических моделей⁶ [5].

Закрутка потока широко используется в технологических устройствах: насосы, гидротурбины, циклонные аппараты, сепараторы, горелочные и топочные устройства, химические реакторы и др. При этом режимы движения рабочих сред существенно зависят от способа организации закрутки, интенсивности крутки, свойств среды и условий протекания процесса (одно-/многофазный, с теплообменом, с химическим реагированием, с наложенными массовыми силами и пр.). Пространственное математическое моделирование потоков в последние годы широко используется в исследовательской и проектной работе при создании технологических аппаратов [6].

ОПИСАНИЕ МУЛЬТИВИХРЕВОГО ТЕПЛОМАСОБМЕННОГО УСТРОЙСТВА

Авторами была разработана конструкция мультिवихревого контактного устройства (рис. 1), предназначенная для проведения процессов тепло- и массообмена в поле центробежных сил. Отличительной особенно-

⁶Лаптев А. Г., Николаев Н. А., Башаров М. М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: учеб.-справ. пособ. М.: Изд-во «Теплотехник», 2011. 335 с.

стью предлагаемой конструкции является то, что внутренняя труба имеет прорези, через которые газ проходит при относительно невысокой скорости и начинает закручиваться, образуя два вихревых потока. При этом не требуется установка дополнительных закручивающих устройств для создания вихревых структур газожидкостных потоков.

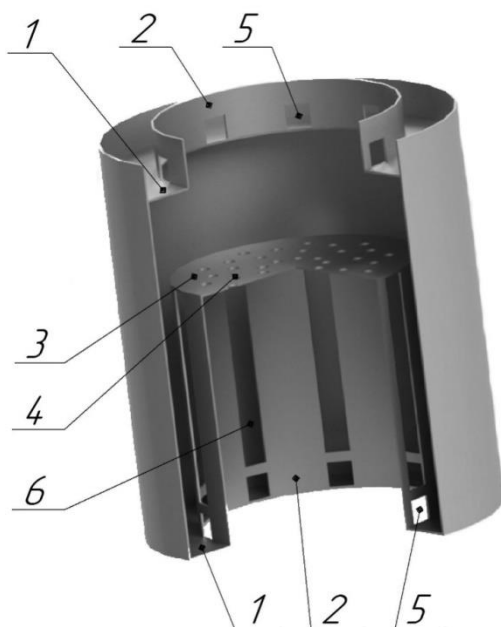


Рис. 1. Мультивихревое тепломассообменное устройство: 1 – днище контактной ступени, 2 – цилиндрический патрубок, 3 – крышка, 4 – отверстия, 5 – сливные отверстия, 6 – прямоугольные прорези

Fig. 1. Multi vortex heat and mass transfer device: 1 – bottom of the contact stage, 2 – cylindrical branch pipe, 3 – cover, 4 – holes, 5 – drain holes, 6 – rectangular slots

Мультивихревое тепломассообменное устройство (см. рис. 1) включает вертикально жестко установленный на днище (1) цилиндрический патрубок (2) для подачи газа. Нижняя часть патрубка имеет равномерно расположенные по окружности отверстия (5) для слива жидкости. Цилиндрический патрубок (2) снабжен крышкой (3) с отверстиями (4) для распределения жидкости. Нижняя часть патрубка (2) имеет равномерно расположенные по окружности отверстия (5), предназначенные для слива жидкости. В центральной части патрубка выполнены равномерно расположенные по окружности продольные прямоугольные прорези (6) для

прохода газа, суммарная площадь сечений которых равна площади внутреннего диаметра цилиндрического патрубка.

Мультивихревое тепломассообменное устройство работает следующим образом: газ поступает снизу в цилиндрический патрубок, завихряется при прохождении через прямоугольные прорези и образует закрученное течение в кольцевом зазоре между патрубком и корпусом тепломассообменного аппарата.

Жидкость поступает в контактное устройство через отверстия (5) вышележащей ступени в зону, образованную между днищем контактной ступени (1) и крышкой (3), где мгновенно разбивается восходящим потоком газа на отдельные струи и капли. Далее основная часть распавшейся жидкости под действием центробежных сил отбрасывается к стенке аппарата, где создается пленочное течение. Другая часть жидкости (как правило, при высоких нагрузках по жидкости) распределяется через отверстия (4), выполненные в крышке, для стекания во внутреннюю полость цилиндрического патрубка (2).

Так, при малых и средних нагрузках по жидкости, по всей высоте контактного патрубка в кольцевом зазоре аппарата наблюдается следующая картина: из стекающей по стенке аппарата пленке жидкости, под действием закрученного потока газа, срываются отдельные капли жидкости, образуя при этом закрученное газожидкостное течение. Вихревое взаимодействие фаз наблюдается по всей высоте контактного патрубка. Далее после интенсивного контакта фаз газожидкостная смесь поступает в зону сепарации, расположенную между днищем вышележащей ступени и крышкой, где происходит отделение газа и жидкости. Таким образом, отсепарированный поток газа направляется вверх в цилиндрический патрубок вышележащего контактного устройства многоступенчатого тепломассообменного аппарата. Жидкость при этом отводится из контактной ступени через сливные отверстия (5).

При более высоких нагрузках по жидкой фазе наблюдается увеличение расходов жидкости, как в пленке, стекающей вдоль стенки аппарата, так и во внутренней части

цилиндрического патрубка (2) в виде отдельных струй.

Задача, на решение которой направлено предлагаемое мультивихревое устройство, состоит в интенсификации процессов тепло- и массоотдачи у внутренних стенок гидродинамического пограничного слоя корпуса аппарата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемое мультивихревое теплообменное устройство состоит из корпуса 3 диаметром 100 мм (длина 102 мм) и цилиндрического патрубка 2 с наружным диаметром равное 67 мм (длина 132 мм). При этом толщина стенки корпуса и цилиндрического патрубка составляла 2 мм. В патрубке 2 равномерно по всей окружности выполнены 8 прямоугольных прорезей шириной 13,08 мм и высотой 16 мм (рис. 2).

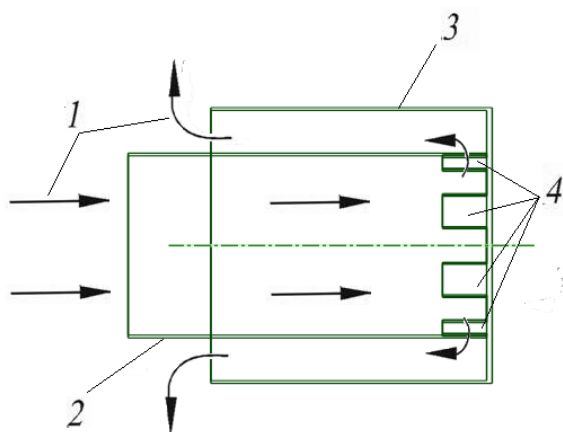


Рис. 2. Исследуемое мультивихревое теплообменное устройство: 1 – рабочая среда, 2 – цилиндрический патрубок, 3 – корпус устройства, 4 – прямоугольные прорези

Fig. 2. A multi vortex heat exchange device under investigation: 1 – working fluid, 2 – cylindrical branch pipe, 3 – device casing, 4 – rectangular slots

Для исследования разработанного устройства использовалось численное моделирование в программе ANSYS Fluent. Было выполнено CFD-моделирование, для реше-

ния задачи применялся метод RANS, основанный на уравнениях Навье–Стокса (уравнения движения и неразрывности), осредненных по Рейнольдсу. Была создана 3d-модель обтекания препятствий с структурированной равномерной расчетной сеткой с размером ячейки 0,0012 м, количеством ячеек – 1950040, количеством узлов – 347498.

После создания сетки выбраны типовые условия решения задачи и типы граничных условий: стационарный режим теплообмена, втекание потока в расчетную область со скоростью 0,2 м/с, 0,5 м/с, 1 м/с при температуре 293 К, на выходе из кольцевого пространства задавалось давление, на стенках устанавливалась температура 273 К, уравнение энергии. В задаче использовалась модель SST k- ω с типовыми эмпирическими коэффициентами, устанавливаемыми программой по умолчанию. Одно из преимуществ разработки k- ω (ω – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии) – это возможность обработки пристеночных областей при вычислениях для малых чисел Рейнольдса [7]. Таким образом, в модели [8] применяют более простые функции стенок, чем в k- ϵ моделях, обеспечивая лучшую надежность и точность. В качестве рабочих сред однофазных потоков использовались вода и воздух с типовыми физическими свойствами. В решателе использовался алгоритм SIMPLE с типовыми эмпирическими коэффициентами, устанавливаемыми программой по умолчанию. Выбор представленного метода был обусловлен тем, что алгоритм SIMPLE использует взаимосвязь между поправками на скорость и давление, чтобы обеспечить сохранение массы и получить поле давления⁷ [9].

Для сравнения была смоделирована аналогичная по геометрическим и физическим параметрам конструкция – трубка Фильда. Отличие заключалось в наличии симметричных отверстий на нижнем конце цилиндрического патрубка вместо прорезей, предназначенных для прохода газа или жидкости в кольцевой зазор.

⁷Pressure-Velocity Coupling [Электронный ресурс]. URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node373.htm> (19.11.2021).

По результатам численного моделирования были определены критерии Нуссельта для расчета коэффициента теплоотдачи от внутренней стенки и от дна исследуемого устройства при создании вихрей и без них.

Коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки корпуса мультивихревого устройства при создании вихрей можно определить по уравнению:

$$Nu_{vw} = 0,14 Re^{0,75} Pr^{0,3}.$$

Коэффициент теплоотдачи от дна при создании вихрей можно определить:

$$Nu_{vb} = 0,89 Re^{0,5} Pr^{0,33}.$$

Коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки корпуса мультивихревого устройства без создания вихрей можно определить:

$$Nu_w = 0,023 Re^{0,9} Pr^{0,3}.$$

Коэффициент теплоотдачи от дна без создания вихрей можно определить:

$$Nu_b = 0,154 Re^{0,66} Pr^{0,3}.$$

Относительная погрешность аппроксимации мультивихревого теплообменного устройства составила $\pm 20\%$, трубки Фильда – $\pm 23\%$.

Увеличение интенсивности теплоотдачи от стенки можно оценить по соотношению:

$$\frac{Nu_{vw}}{Nu_w} = \frac{6,08}{Re^{0,15}}.$$

Увеличение интенсивности теплоотдачи от дна можно оценить по соотношению:

$$\frac{Nu_{vw}}{Nu_w} = \frac{5,78}{Re^{0,16}}.$$

Из графика, представленного на рис. 3, видно, что интенсивность теплоотдачи в

мультивихревом устройстве увеличивается с уменьшением числа Рейнольдса, т.е. при невысоких скоростях рабочих сред. Кроме того, использование данного режима приводит к снижению гидравлического сопротивления устройства.

Установлено, что интенсивность теплоотдачи от внутренней стенки мультивихревого теплообменного устройства превышает теплоотдачу от дна на 12,7–15,8% в зависимости от числа Рейнольдса. При этом значения коэффициентов теплоотдачи на внутренней стенке устройства могут достигать 14747 Вт/(м²·К) при средней скорости течения жидкости равной 1 м/с.

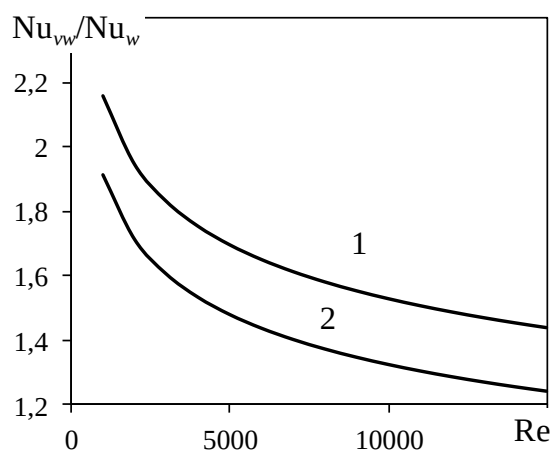


Рис. 3. Зависимость увеличения интенсивности теплоотдачи в мультивихревом устройстве от числа Рейнольдса: 1 – от внутренней стенки, 2 – от дна

Fig. 3. Dependence of the increase in heat transfer intensity in a multi vortex device on the Reynolds number: 1 – on the inner wall, 2 – on the bottom

Коэффициенты массоотдачи в газовой фазе можно найти, используя аналогию Льюиса [10]:

$$\frac{\alpha_G}{\beta_G} = C_{PG} \cdot \left(\frac{Sc_G}{Pr_G} \right)^{0,5},$$

где α_G – коэффициент теплоотдачи в газовой фазе, Вт/(м²·К); β_G – коэффициент массоотдачи в газовой фазе, кг/(м²·с); C_{PG} – удельная массовая теплоемкость газа, Дж/(кг·К); $Pr_G = \nu_G/a_G$ – число Прандтля; $Sc_G = \nu_G/D_G$ –

число Шмидта; ν_G – коэффициент кинематической вязкости газа, $\text{м}^2/\text{с}$; a_G – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; D_G – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное мультивихревое тепло-массообменное устройство обеспечивает формирование закрученного газового или жидкостного течения в кольцевом зазоре между патрубком и корпусом устройства. Такое взаимодействие фаз характеризуется высокими коэффициентами теплоотдачи, высокой интенсивностью теплопередачи. Таким образом, создание условий для увеличения скоростей движения контактирующих фаз относительно друг друга и непрерывное обновление межфазной поверхности способствует повышению эффективности тепло-массообменного аппарата. Наличие перфо-

рированной крышки способствует равномерному перераспределению жидкости по сечению контактного устройства, что снижает риск захлебывания устройства, позволяя эксплуатировать аппарат как при низких, так и при высоких нагрузках по жидкости с высокой эффективностью.

Простота конструкции контактного устройства дает возможность снижения объема и веса теплообменных аппаратов [11–23].

При этом проведенные численные исследования показывают возможности достижения высоких значений удельного теплового потока через стенку контактной ступени, что позволяет наиболее эффективно использовать в процессах, связанных с дополнительным подводом или отводом тепла из контактной ступени через внешнюю поверхность устройства.

Список источников

1. Войнов Н. А., Жукова О. П., Ледник С. А., Николаев Н. А. Массоотдача в газожидкостном слое на вихревых ступенях // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47. № 1. С. 62–67. <http://doi.org/10.7868/S004035711301017X>.
2. Khafizov F. S., Afanasenko V. G., Khafizov I. F., Khaibrakhmanov A. S., Boev E. V. Use of vortex apparatuses in gas cleaning process // Chemical and Petroleum Engineering. 2008. Vol. 44. No. 7. P. 425–428. <https://doi.org/10.1007/s10556-008-9081-z>.
3. Николаев А. Н., Овчинников А. А., Николаев Н. А. Высокоэффективные вихревые аппараты для комплексной очистки больших объемов промышленных газовых выбросов // Химическая промышленность. 1992. № 9. С. 36–38.
4. Dadvand A., Hosseini S., Aghebatandish S., Khoo Boo Cheong. Enhancement of heat and mass transfer in a microchannel via passive oscillation of a flexible vortex generator // Chemical Engineering Science. 2019. Vol. 207. P. 556–580. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.06.045>.
5. Gorbunova A., Klimov A., Molevich N., Moralev I., Porfiriev D., Sugak S., Zavershinskii I. Precessing vortex core in a swirling wake with heat release // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2016. Vol. 59. P. 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.03.002>.
6. Henze M., Von Wolfersdorf J., Weigand B., Dietz C.F., Neumann S.O. Flow and heat transfer characteristics behind vortex generators – a benchmark dataset // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2011. Vol. 32. No. 1. P. 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.07.005>.
7. Ляндзберг А. Р., Латкин А. С. Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке: монография. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2004. 149 с.
8. Deev V. I., Kharitonov V. S., Churkin A. N. Analysis and generalization of experimental data on heat transfer to supercritical pressure water flow in annular channels and rod bundles // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. No. 2. P. 142–150. <https://doi.org/10.1134/S0040601516110021>.
9. Tarasevich S. E., Fedyaev V. L., Yakovlev A. B., Morenko I. V. Experimental and numerical investigation of heat transfer in annular channels with flow twisting // Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (Rio Grande, 8–12 July 2012). Rio Grande, 2012. Vol. 2. P. 109–114. <https://doi.org/10.1115/HT2012-58430>.
10. Nasiri M., Etemad S. Gh., Bagheri R. Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 38. No. 7. P. 958–963. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.04.011>.
11. Riya Lin, Xiaoqian Wang, Weidong Xu, Xinfeng Jia, Zhiying Jia. Experimental and numerical study on forced convection heat transport in eccentric annular channels // International Journal of Thermal Sciences. 2019. Vol. 136. P. 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.003>.
12. Mauro A. W., Cioncolini A., Thome J. R., Mastrullo R.

Asymmetric annular flow in horizontal circular macro-channels: basic modeling of liquid film distribution and heat transfer around the tube perimeter in convective boiling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 77. P. 897–905. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.021>.

13. Cotton J. S., Robinson A. J., Shoukri M., Chang J. S. AC voltage induced electrohydrodynamic two-phase convective boiling heat transfer in horizontal annular channels // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012. Vol. 41. P. 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.003>.

14. Wang Han, Bi Qincheng, Yang Zhendong, Gang Wu, Hu Richa. Experimental and numerical study on the enhanced effect of spiral spacer to heat transfer of supercritical pressure water in vertical annular channels // *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 48. P. 436–445. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.05.010>.

15. Abou-Ziyan H. Z., Helali A. H. B., Selim M. Y. E. Enhancement of forced convection in wide cylindrical annular channel using rotating inner pipe with interrupted helical fins // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 95. P. 996–1007. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.066>.

16. Togun H., Abdulrazzaq T., Kazi S. N., Badarudin A., Kadhum A. A. H., Sadeghinezhad E. A review of studies on forced, natural and mixed heat transfer to fluid and nanofluid flow in an annular passage // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 39. P. 835–856. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.008>.

17. Lorenzon A., Vaglio E., Casarsa L., Sortino M., Totis G., Saragò G., et al. Heat transfer and pressure loss performances for additively manufactured pin fin arrays in annular channels // *Applied Thermal Engineering*. 2021. P. 117851. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117851>.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117851>.

18. Butcher H., Quenzel C. J. E., Breziner L., Mettes J., Wilhite B. A., Bossard P. Design of an annular microchannel reactor (AMR) for hydrogen and/or syngas production via methane steam reforming // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Iss. 31. P. 18046–18057. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.109>.

19. Deev V. I., Kharitonov V. S., Baisov A. M., Churkin A. N. Universal dependencies for the description of heat transfer regimes in turbulent flow of supercritical fluids in channels of various geometries // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018. Vol. 135. P. 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.01.019>.

20. Liu Huan-ling, Qi Dong-hao, Shao Xiao-dong, Wang Wei-dong. An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement in annular microchannel heat sinks // *International Journal of Thermal Sciences*. 2019. Vol. 142. P. 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.006>.

21. Du D. X., Tian W. X., Su G. H., Qiu S. Z., Huang Y. P., Yan X. Theoretical study on the characteristics of critical heat flux in vertical narrow rectangular channels // *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.039>.

22. Дектерев А. А. Математическое моделирование закрученных течений в приложении к промышленным задачам // *Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: матер. VI Всерос. конф. с междунар. участием (г. Новосибирск, 21–23 ноября 2017 г.)*. Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2017. С. 16.

23. Лаптев А. Г., Фарахов Т. М., Дударовская О. Г. Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями: монография. СПб.: Изд-во «Страта», 2016. 214 с.

References

1. Voinov N. A., Zhukova O. P., Lednik S. A., Nikolaev N. A. Mass transfer in gas-liquid layer on vortex contact stages. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*. 2013;47(1):62–67. <http://doi.org/10.7868/S004035711301017X>. (In Russ.).

2. Khafizov F. S., Afanasenko V. G., Khafizov I. F., Khaibrakhmanov A. S., Boev E. V. Use of vortex apparatuses in gas cleaning process. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2008;44(7):425–428. <https://doi.org/10.1007/s10556-008-9081-z>.

3. Nikolaev A. N., Ovchinnikov A. A., Nikolaev H. A. Highly efficient vortex apparatuses for complex treatment of large volumes of industrial gas emissions. *Himicheskaya promyshlennost'*. 1992;9:36–38. (In Russ.).

4. Dadvand A., Hosseini S., Aghebatandish S., Khoo Boo Cheong. Enhancement of heat and mass transfer in a microchannel via passive oscillation of a flexible vortex generator. *Chemical Engineering Science*. 2019;207:556–580. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.06.045>.

5. Gorbunova A., Klimov A., Molevich N., Moralev I., Porfiriev D., Sugak S., Zavershinskii I. Precessing vortex core in a swirling wake with heat release. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2016;59:100–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.03.002>.

6. Henze M., Von Wolfersdorf J., Weigand B., Dietz C. F., Neumann S. O. Flow and heat transfer characteristics behind vortex generators – a benchmark dataset. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2011;32(1):318–328. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.07.005>.

7. Lyandzberg A. R., Latkin A. S. *Vortex heat exchangers and condensation in a swirling flow*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchatka State Technical University; 2004, 149 p. (In Russ.).

8. Deev V. I., Kharitonov V. S., Churkin A. N. Analysis and generalization of experimental data on heat transfer to supercritical pressure water flow in annular channels and rod bundles. *Thermal Engineering*. 2017;64(2):142–150. <https://doi.org/10.1134/S0040601516110021>.

9. Tarasevich S. E., Fedyaev V. L., Yakovlev A. B., Morenko I. V. Experimental and numerical investigation of heat transfer in annular channels with flow twisting. In: *Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. 8–12 July 2012, Rio Grande. Rio Grande; 2012, vol. 2, p. 109–114. <https://doi.org/10.1115/HT2012-58430>.
10. Nasiri M., Etemad S. Gh., Bagheri R. Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011;38(7):958–963. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.04.011>.
11. Riya Lin, Xiaoqian Wang, Weidong Xu, Xinfeng Jia, Zhiying Jia. Experimental and numerical study on forced convection heat transport in eccentric annular channels. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019;136:60–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.003>.
12. Mauro A. W., Cioncolini A., Thome J. R., Mastrullo R. Asymmetric annular flow in horizontal circular macro-channels: basic modeling of liquid film distribution and heat transfer around the tube perimeter in convective boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;77:897–905. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.021>.
13. Cotton J. S., Robinson A. J., Shoukri M., Chang J. S. AC voltage induced electrohydrodynamic two-phase convective boiling heat transfer in horizontal annular channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012;41:31–42. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.003>.
14. Wang Han, Bi Qincheng, Yang Zhendong, Gang Wu, Hu Richa. Experimental and numerical study on the enhanced effect of spiral spacer to heat transfer of supercritical pressure water in vertical annular channels. *Applied Thermal Engineering*. 2012;48:436–445. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.05.010>.
15. Abou-Ziyan H. Z., Helali A. H. B., Selim M. Y. E. Enhancement of forced convection in wide cylindrical annular channel using rotating inner pipe with interrupted helical fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016;95:996–1007. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.066>.
16. Togun H., Abdulrazzaq T., Kazi S. N., Badarudin A., Kadhum A. A. H., Sadeghinezhad E. A review of studies on forced, natural and mixed heat transfer to fluid and nanofluid flow in an annular passage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;39:835–856. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.008>.
17. Lorenzon A., Vaglio E., Casarsa L., Sortino M., Totis G., Saragò G., et al. Heat transfer and pressure loss performances for additively manufactured pin fin arrays in annular channels. *Applied Thermal Engineering*. 2021;117851. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117851>.
18. Butcher H., Quenzel C. J. E., Breziner L., Mettes J., Wilhite B. A., Bossard P. Design of an annular microchannel reactor (AMR) for hydrogen and/or syngas production via methane steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014;39(31):18046–18057. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.109>.
19. Deev V. I., Kharitonov V. S., Baisov A. M., Churkin A. N. Universal dependencies for the description of heat transfer regimes in turbulent flow of supercritical fluids in channels of various geometries. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018;135:160–167. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.01.019>.
20. Liu Huan-ling, Qi Dong-hao, Shao Xiao-dong, Wang Wei-dong. An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement in annular microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019;142:106–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.006>.
21. Du D. X., Tian W. X., Su G. H., Qiu S. Z., Huang Y. P., Yan X. Theoretical study on the characteristics of critical heat flux in vertical narrow rectangular channels. *Applied Thermal Engineering*. 2012;36:21–31. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.039>.
22. Dekterev A. A. Mathematical modeling of swirling flows as applied to industrial problems. In: *Teplo-massoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh: materialy VI Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows: Materials of the 6th All-Russian Conference with international participation*. 21–23 November 2017, Novosibirsk. Novosibirsk: Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS; 2017, p. 16. (In Russ.).
23. Laptev A. G., Farahov T. M., Dudarovskaya O. G. Efficiency of transfer phenomena in the channels with chaotic packed layers. St. Petersburg: Strata; 2016, 214 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриев Андрей Владимирович,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой теоретических основ
теплотехники,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrey V. Dmitriev,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Theoretical Foundations
of Heat Engineering,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia

Мадышев Ильнур Наилович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой машин и аппаратов
химических производств,
Нижнекамский химико-технологический институт,
филиал Казанского национального
исследовательского технологического университета,
423570, г. Нижнекамск, ул. Строителей, 47, Россия

Галимова Альбина Талгатовна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры процессов и аппаратов химических
технологий,
Нижнекамский химико-технологический институт,
филиал Казанского национального
исследовательского технологического университета,
423570, г. Нижнекамск, ул. Строителей, 47, Россия

Сахибгареев Нурислам Фаритович,
студент,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия

Бадретдинова Гузель Рамилевна,
аспирант,
Казанский государственный энергетический
университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.12.2021; одобрена после рецензирования 24.02.2022; принята к публикации 13.05.2022.

Ilnur N. Madyshev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Machines and Equipment
of Chemical Production,
Nizhnekamsk Chemical Technology Institute,
Branch of Kazan National Research Technological
University,
47, Stroiteley St., Nizhnekamsk 423570, Russia

Albina T. Galimova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Chemical
Technology Processes and Equipment,
Nizhnekamsk Chemical Technology Institute,
Branch of Kazan National Research Technological
University,
47, Stroiteley St., Nizhnekamsk 423570, Russia

Nurislam F. Sakhibgareev,
Student,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia

Guzel R. Badretdinova,
Postgraduate student,
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 09.12.2021; approved after reviewing 24.02.2022; accepted for publication 13.05.2022.



Научная статья

УДК 662.739

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-270-283>

Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Тыва до и после их карбонизации

Андрей Владимирович Жуйков^{1✉}, Дмитрий Александрович Логинов²,
Григорий Романович Монгуш³, Станислав Викторович Чичерин⁴,
Николай Алексеевич Землянский⁵

^{1,5} Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

² Сибирский научно-исследовательский институт углеобогащения, г. Красноярск, Россия

³ ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов, г. Кызыл, Россия

⁴ Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

¹ azhuikov@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

² 2901496@gmail.com

³ mongush983@mail.ru

⁴ man_csv@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9359-9678>

⁵ nikzemln@mail.ru

Резюме. Целью данной работы является определение основных характеристик горения каменных углей Республики Тыва до и после их карбонизации. При решении поставленных задач применялся термогравиметрический метод и метод электронной микроскопии. Для объектов исследования был проведен теплотехнический и элементный анализ. Теплотехнический и элементный анализ показал, что содержание летучих в Каа-Хемском угле достаточно высокое – 47,5%, а в исследуемом Чаданском ниже на 10%; после карбонизации произошло снижение летучих до 11,5% и 9,3%, соответственно. По результатам термогравиметрического анализа установлено следующее: температура воспламенения коксового остатка после карбонизации у Каа-Хемского угля увеличилась на 76°C, у Чаданского угля – на 90°C; температура выгорания коксового остатка после карбонизации (723°C) у Каа-Хемского угля практически не изменилась, у Чаданского угля температура выгорания увеличилась с 704°C до 727°C. Определено, что карбонизация углей повлияла на снижение максимальной скорости реакции: у Каа-Хемского угля данный показатель снизился с 19%/мин до 10%/мин, у Чаданского – с 26%/мин до 11%/мин. Установлено, что процесс горения коксового остатка после карбонизации углей сдвинулся в область более высоких температур: с интервала температур 448–723°C сместился до 524–724°C (для Каа-Хемского угля), с 436–704°C до 526–727°C (для Чаданского угля). Проведенный морфологический анализ поверхностей угольных частиц до и после карбонизации показал, что на поверхности карбонизатов появились поры и трещины более крупного размера по сравнению с углем до карбонизации. Таким образом, термогравиметрическим методом анализа установлено, что основной параметр, влияющий на улучшение основных характеристик горения в условиях неизотермического нагрева изученных углей Республики Тыва до и после их карбонизации, является содержание летучих веществ, а не развитая пористая структура частиц.

Ключевые слова: уголь, карбонизат, степень метаморфизма, термогравиметрический анализ, горение, воспламенение

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (проект № 2022031008477).

Для цитирования: Жуйков А. В., Логинов Д. А., Монгуш Г. Р., Чичерин С. В., Землянский Н. А. Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Тыва до и после их карбонизации // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 270–283. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-270-283>.

Thermogravimetric analysis of the combustion of Tuva coals before and after their carbonization

Andrei V. Zhuikov^{1✉}, Dmitry A. Loginov², Grigory R. Mongush³,
Stanislav V. Chicherin⁴, Nikolai A. Zemlyansky⁵

^{1,5}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Research Institute of Coal Concentration, Krasnoyarsk, Russia

³Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russia

⁴Omsk State Transport University, Omsk, Russia

¹azhuikov@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

²2901496@gmail.com

³mongush983@mail.ru

⁴man_csv@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9359-9678>

⁵nikzemln@mail.ru

Abstract. The process of combusting Tuva coals before and after their carbonization was studied using the methods of thermogravimetric analysis and electron microscopy. Coal samples were subjected to thermomechanical and elemental analysis, which revealed a higher content of volatile substances in Kaa-Khem coal (47.5%) compared to Chadan coal (10%). Following carbonization, a decrease in volatile substances to 11.5% and 9.3%, respectively, was observed. The conducted thermogravimetric analysis showed the ignition temperature of the coke residue of the Kaa-Khem and Chadan coal samples to increase by 76°C and 90°C, respectively, after carbonization. The burnup temperature of the coke residue after carbonizing (723°C) Kaa-Khem coal samples remained effectively the same, while the Chadan coal showed an increase from 704°C to 727°C. The carbonization of coals was established to decrease the maximum reaction rate from 19% per min to 10% per min for Kaa-Khem coal and from 26% per min to 11% per min for Chadan coal. The process of combusting the coke residue after coal carbonization was found to shift into the region of higher temperatures: from 448–723°C to 524–724°C for Kaa-Khem coal and from 436–704°C to 526–727°C for Chadan coal. A morphological analysis of the surface of coal particles after carbonization showed the appearance of larger-size pores and cracks on the surface of carbonates compared to coal before carbonization. The conclusion is made that the content of volatile substances, rather than the developed pore structure, comprises the main factor in improving the combustion characteristics of Tuva coals under the conditions of non-isothermal heating before and after their carbonization.

Keywords: coal, carbonize, metamorphism degree, thermal gravimetric analysis, combustion, ignition

Funding: The study was funded by the Government of the Krasnoyarsk Territory, the Krasnoyarsk Regional Fund for Support of Scientific and Scientific and Technological Activities (Project No. 2022031008477).

For citation: Zhuikov A. V., Loginov D. A., Mongush G. R., Chicherin S. V., Zemlyansky N. A. Thermogravimetric analysis of the combustion of Tuva coals before and after their carbonization. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):270-283. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-270-283>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из крупных угольных месторождений Республики Тыва является Улуг-Хемский угольный бассейн, общая площадь которого охватывает несколько кожуунов: Кызылский, Тандинский, Чеди-Хольский и Пий-Хемский. Улуг-Хемский угольный бассейн включает в себя несколько месторождений: Каа-Хемское, Межегейское, Эзрбекское, Элегестское, Чихачевское и Юго-Восточную угленосную площадь. В ходе исследования запасы и

ресурсы угля, как всего Улуг-Хемского угольного бассейна в целом, так и отдельных его частей, неоднократно оценивались различными исследователями с использованием различных методов и принципов расчета. Месторождение Каа-Хемское расположено на территории Кызыл-кожууна. С 1976 г. на месторождении Каа-Хемское ведется добыча угля открытым способом в объеме 500–600 тыс. т в год. История освоения месторождения Каа-Хем, включая его начальные этапы,

неотделима от истории освоения Улуг-Хемского бассейна в целом [1, 2].

Чаданская угленосная площадь расположена на территории кожууна Дзун-Хемчикский с административным центром Чадан. Это месторождение включает в себя Чаданское и Чангыс-Хадынское месторождения. Рядом с угленосным районом проходит дорога А-162 Кызыл-Ак-Довурак с твердым асфальтовым покрытием. Юрские породы в этом районе были впервые отмечены М. В. Заниным в 1946 г. В 1964 г. Чаданский угольный разрез был введен в эксплуатацию угледобывающими предприятиями местной промышленности. По промышленной классификации и степени метаморфизма каменные угли Чаданского пласта находятся на границе между газообразными и жирными и применяются при производстве тепловой энергии [1, 2].

Обладая большим потенциалом запасов высококачественного угля, республика не получила достаточного развития угольной промышленности, основной проблемой которой является отсутствие железной дороги и высокая стоимость транспортировки крупнотоннажных грузов за пределы республики автомобильным транспортом. Основными потребителями угля с Каа-Хемского месторождения являются Кызыльская ТЭЦ, котельные и частные дома города Кызыл, а также бюджетные предприятия и частные дома кожуунов в Восточной части республики, а уголь с Чаданского месторождения снабжает социальные объекты в Западной части региона [2].

Согласно «Программе развития угольной промышленности России на период до 2035 года», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. № 1582-р⁶, предполагается дальнейшее освоение Каа-Хемского и Чаданского угольных месторождений Республики Тыва и продолжением строительства железнодорожной линии Элегест–Кызыл–Курагино, начатой в 2018 г.

Совершенствование развития угольной промышленности подразумевает поиск новых способов переработки ископаемого топ-

лива с целью получения высокопотенциальных продуктов [3, 4]. Одним из способов получения высокорекреационного топлива из угля является его газификация. Газификация – это процесс, представляющий собой термохимическую деструкцию топлива при температурах от 800 до 1200°C при подводе окислителя в виде воздуха, пара или кислорода в чистом виде [5]. На качество получаемого продукта (высокая механическая прочность, повышенная теплота сгорания, низкое водопоглощение, высокая реакционная способность, повышенное удельное электросопротивление) при газификации угля также влияет давление внутри реактора и время нагрева. Высокое давление внутри реактора позволяет получать карбонизированный уголь при более высокой скорости нагрева, что снижает время производства продукта газификации [6]. Продуктом частичной газификации является карбонизированный уголь, который используется в большей мере как углеродный восстановитель в металлургической промышленности и других производствах, требующих высококалорийного топлива. В теплоэнергетике карбонизированный уголь как основное энергетическое топливо не используется из-за экономической нецелесообразности, так как его производство достаточно затратное. В теплоэнергетике используется генераторный газ с низкой теплотой сгорания, который получается как второстепенный продукт процесса газификации угля. Генераторный газ сжигается в котлах-утилизаторах для подогрева сетевой воды [7]. При производстве тепловой и электрической энергии на теплоэлектростанциях в ряде случаев целесообразно использовать карбонизированный уголь как добавочное топливо с целью увеличения теплоты сгорания твердотопливной смеси, тем самым снижая общий расход топлива на ТЭЦ [8].

Одним из самых распространенных методов исследования процесса горения топлив является синхронный термический анализ [9–12]. Сущность данного метода заключается в изменении массы топлива при его мед-

⁶Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1582-р. от 13.06.2020. Электронный ресурс. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006180009> (15.06.2021).

ленном нагреве. Данный метод позволяет определять основные параметры горения топлива. Шаовэй Чжан и др. исследовали [13] характеристики воспламенения и выгорания полукокса, получаемого из бурого угля, при помощи синхронного термического анализа, и установили, что полукокс является низко-реакционным топливом, имеющим более высокую температуру воспламенения по сравнению с бурым углем. Использование полукокса как индивидуального топлива для производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ связано с некоторыми сложностями при его сжигании [14, 15] из-за низкого содержания летучих. Поэтому авторами предложено использовать полукокс, полученный из каменных углей, как добавочное топливо, сжигаемое вместе с каменными углями.

Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день существует необходимость в проведении дополнительных исследований горения карбонизированных углей с целью расширения теоретических знаний и получения дополнительных экспериментальных данных. Полученные результаты можно будет применять при проектировании теплотехнических устройств, работающих на новых видах топлива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований в данной работе стали следующие:

1. Каа-Хемский каменный уголь, Каа-Хемский угольный разрез (КХ_{уголь}), Республика Тыва (рис. 1 а);
2. Чаданский каменный уголь, Чаданский угольный разрез (ЧД_{уголь}), Республика Тыва (рис. 1 б);
3. Карбонизат из Каа-Хемского угля, Красноярский край (КХ_{кокс}) (рис. 1 с);
4. Карбонизат из Чаданского угля, Красноярский край (ЧД_{кокс}) (рис. 1 д).

Карбонизат был получен путем нагрева

угля в закрытой реторте до температуры 600°C с последующим охлаждением без доступа воздуха во избежание окисления. Частичная газификация этих углей в известных процессах является затруднительной ввиду эффекта размягчения и последующего спекания, характерного для углей марки ГЖ (газовый-жирный). Поэтому разработка высокопроизводительного процесса карбонизации этих углей является предметом отдельных исследований.

Характеристики углей и карбонизатов изучены после достижения ими состояния аналитической пробы, влажность которой доведена до состояния равновесия с влажностью воздуха в лабораторном помещении. Образцы углей с начальным размером менее 10 мм по отдельности измельчали в дисковой мельнице Retsch DM 200 (Retsch GmbH, Germany). Для подготовки экспериментальных образцов использовалась аналитическая просеивающая машина Retsch AS 200 BASIC (Retsch GmbH, Germany) с двумя ситами, размер ячеек которых составлял 53 и 200 мкм. Таким образом, получались образцы углей с размерами частиц 53–200 мкм, что соответствует размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических котлах. Теплоту сгорания топливных образцов определяли в калориметре IKA C6000. Элементный состав топлива определяли в анализаторе Vario MACRO cube (Elementar, Германия). Влажность определялась по ГОСТ 8.649-2015⁷, зольность – по ГОСТ 55661-2013⁸, выход летучих веществ – по ГОСТ R 55660-2013, содержание серы – по ГОСТ 32979-2014⁹, высшая теплота сгорания – по ГОСТ 147-2013¹⁰, содержание углерода, водорода, азота – по ГОСТ 32979-2014⁹, серы – по ГОСТ 8606-2015, содержание кислорода – по ГОСТ 27313-2015¹¹.

⁷ГОСТ 8.649-2015. Угли бурые, каменные и антрацит. Инфракрасный термогравиметрический метод определения общей влаги. Введ. 01.01.2017. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019.

⁸ГОСТ 55661-2013. Топливо твердое минеральное. Определение зольности. Введ. 01.01.2015. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019.

*a**b**c**d*

Рис. 1. Виды топлива: а – Каа-Хемский каменный уголь; б – Чаданский каменный уголь; с – карбонизат из Каа-Хемского угля; d – карбонизат из Чаданского угля
Fig. 1. Types of fuel: a – Kaa-Khemska coal; b – Chadansky coal; c – Kaa-Khemska coal carbonizate; d – Chadansky coal carbonizate

⁹ГОСТ 32979-2014. Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота. Введ. 01.04.2016. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019.

¹⁰ГОСТ R 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. Введ. 01.01.2015. М.: АО «Кодекс», 2015.

¹¹ГОСТ 27313-2015. Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа на различные состояния топлива. Введ. 01.04.2017. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019.

Таблица 1. Технические характеристики и элементный состав образцов
Table 1. Specifications and elemental composition of samples

Топлива	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %	Q_i^r , МДж/кг
КХ _{уголь}	1,3	6,8	47,5	82,0	5,8	1,5	0,3	10,4	29,5
ЧД _{уголь}	0,6	5,1	37,5	85,7	5,6	1,3	0,3	7,1	30,8
КХ _{кокс}	0,7	16,2	11,5	93,3	1,6	1,2	0,4	3,5	27,6
ЧД _{кокс}	0,42	12,7	9,3	97,5	0,8	0,9	0,3	0,5	29,4

Примечание: W^a – содержание влаги в аналитическом состоянии; A^d – содержание золы в сухом состоянии; V^{daf} – содержание летучих веществ в сухом-беззольном состоянии. Элементный состав в сухом беззольном состоянии (daf): C – содержание углерода; H – содержание водорода; N – содержание азота; S – содержание общей серы; O – содержание кислорода; Q_i^r – низшая теплота сгорания в рабочем состоянии.

Термический анализ образцов проводился с применением синхронного термоанализатора SDT Q600. Термогравиметрический (ТГ) и дифференциально-термогравиметрический анализы (ДТГ), а также дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) снимали для навесок топлив массой $6,0 \pm 0,25$ мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин при скорости нагрева $20^\circ\text{C}/\text{мин}$. Основные характеристики процессов горения определяли путем анализа термогравиметрических кривых, полученных из Universal Analysis 2000 (США).

Морфологический анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе ТМ4000 (Япония), оборудованном энергодисперсионным спектрометром и системой рентгеновского микроанализа Quantax150 (Германия) в режиме низкого вакуума (без напыления платины).

По кривым ТГ и ДТГ определяются основные параметры горения, такие как максимальная температура ($T_{\max}$) основного пика ДТГ, при которой достигаются максимальная скорость реакции ($DTG_{\max}$), температура воспламенения ($T_{\text{воспл}}$) и выгорания ($T_{\text{вг}}$) коксового остатка [17–21]. $T_{\text{воспл}}$ и $T_{\text{вг}}$ определяются известным методом [8, 16] основанным на пересечении кривых, визуализация которого представлена на рис. 2. Данный метод заключается в следующем: из $T_{\max}$ опускается перпендикуляр до кривой ТГ до пересечения в точке А, из точки А проводится прямая по наклонной кривой ТГ вверх, до пересечения с прямой проходящей через точку В в верхней части кривой ТГ до пересечения этих прямых в точке С. Затем из точки С опускается перпендикуляр до температурной шкалы, определяя тем самым температуру, соответствующую

ующую $T_{\text{воспл}}$ (см. рис. 2). Температура выгорания коксового остатка определяется по такому же методу, только $T_{\max}$ принимается за значение последнего пика ДТГ. Принято, что $T_{\max}$ обратно пропорционально реакционной способности топлива.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 и 4 показан процесс горения углей и полученного из них карбонизата. Нагрев топлива начинался с 25°C и продолжался до 800°C со скоростью нагрева $20^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Профили кривых ТГ за счет низкого содержания влаги у КХ_{уголь} и КХ_{кокс} демонстрируют длительное снижение в интервале температур $25\text{--}300^\circ\text{C}$. После 300°C у КХ_{уголь} происходит воспламенение и горение летучих веществ в интервале температур $320\text{--}440^\circ\text{C}$, выраженное интенсивной убылью массы (рис. 3 а), увеличением скорости реакции (рис. 3 б) и тепловыделением с максимальной интенсивностью теплового потока 32 мВт/мг (рис. 3 с). Выход летучих веществ Каа-Хемского угля достаточно высок – 47,5% (табл. 1). Горение летучих на поверхности угольной частицы прогревает ее за счет теплообмена и инициирует воспламенение и горение коксового остатка до температуры его полного выгорания около 723°C . Основная стадия горения Каа-Хемского угля представлена тремя пиками ДТГ. Первый (основной) пик ДТГ (см. рис. 3 б) с максимальной скоростью реакции 19%/мин и температуре 473°C (табл. 2) соответствует горению летучих веществ и части коксового остатка. Второй пик ДТГ (см. рис. 3 б) с максимальной скоростью реакции 12%/мин и температуре 545°C отображает горение коксового остатка, при этом

максимальная интенсивность теплового потока составила 65 мВт/мг (см. рис. 3 с). Третий пик ДТГ (рис. 3 б) с максимальной скоростью изменения массы 1,2%/мин при температуре 700°C отображает догорание особо плотного углеродного остатка.

Температура воспламенения $KX_{\text{кокс}}$ на 76°C выше, чем у $KX_{\text{уголь}}$, за счет низкого содержания летучих. Температуры выгорания обоих топлив почти одинаковы. При горении $KX_{\text{кокс}}$ кривые ДТГ отображают два основных пика. Первый (основной) пик ДТГ (см. рис. 3 б) с максимальной скоростью реакции 10%/мин при температуре 610°C отображает горение коксового остатка с максимальной интенсивностью теплового потока 52 мВт/мг. Второй пик ДТГ (см. рис. 3 б) – с максимальной скоростью реакции 3%/мин при температуре 700°C отображает догорание особо плотного углеродного остатка, тепловыделение при этом почти не происходит (рис. 3 с). Теплота сгорания Каа-Хемского угля выше, чем у полученного из него карбонизата. Снижение теплоты сгорания происходит за счет удаления высококалорийных летучих, содержащих водород (см. табл. 1), в процессе термохимической деструкции. Процесс горения по сравнению с исходным Каа-Хемским уг-

лем стал иметь затяжной характер с увеличением диапазона температур, при котором протекает горение коксового остатка (см. рис. 3 б), со снижением значения максимальной скорости изменения массы в основном пике на 90% (табл. 2).

Процесс горения Чаданского угля и полученного из него карбонизата представлен на рис. 4. Из-за низкого содержания влаги в ЧД_{уголь} кривая ТГ в температурном интервале 25–380°C имеет почти горизонтальный вид. При дальнейшем нагреве ЧД_{уголь} начинается его термическое разложение с выходом летучих веществ, процесс сопровождается интенсивной убылью массы (см. рис. 4 а). Воспламенение и горение летучих веществ увеличивает скорость реакции (рис. 4 б). Увеличение температуры угольной частицы за счет горения на ее поверхности летучих веществ приводит к воспламенению коксового остатка при температуре 436°C. Процесс горения ЧД_{уголь} характеризуется тремя пиками ДТГ (см. рис. 4 б). Первый пик ДТГ находится в интервале температур 465–480°C с максимальной скоростью реакции 10%/мин. В этом температурном интервале происходит горение летучих веществ и части коксового остатка, сопровождающееся незначительным

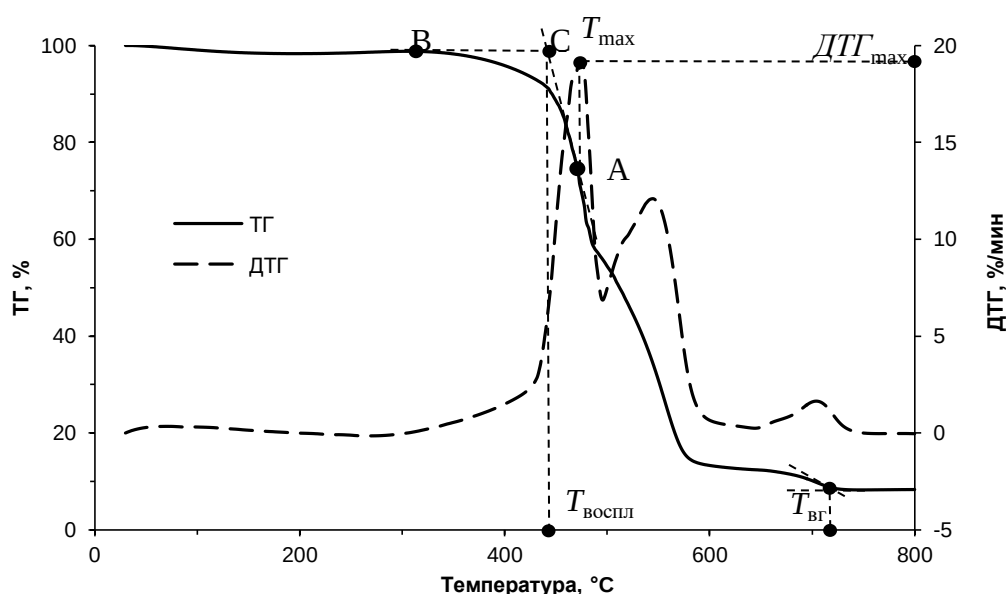


Рис. 2. Определение температуры воспламенения и выгорания
Fig. 2. Determination of ignition and burnup temperatures

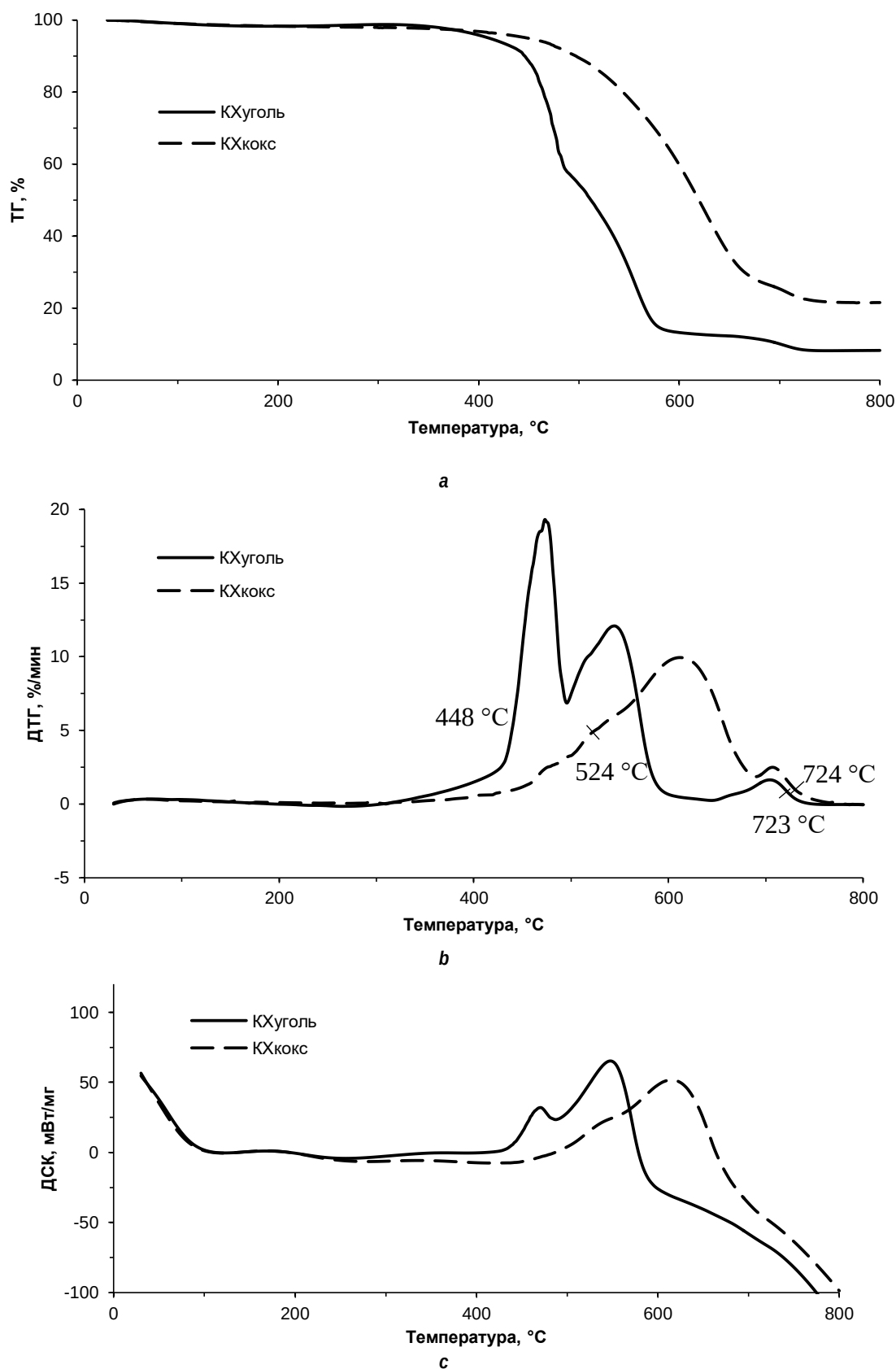


Рис. 3. Горение Каа-Хемского угля и карбонизата: а – термогравиметрический анализ; б – дифференциально-термогравиметрический анализ; с – дифференциальная сканирующая калориметрия
Fig. 3. Combustion of Kaa-Khemskey coal and carbonizate: a – thermal gravimetric analysis; b – differential thermal gravimetric analysis; c – differential scanning calorimetry

Таблица 2. Характеристики горения топливных образцов
Table 2. Combustion characteristics of fuel samples

Топлива	$T_{\text{воспл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{вг}}, ^\circ\text{C}$	$DTG_{\text{max}}, \%/мин$
КХ _{уголь}	448	473	723	19
ЧД _{уголь}	436	552	704	26
КХ _{кокс}	524	612	724	10
ЧД _{кокс}	526	591	727	11

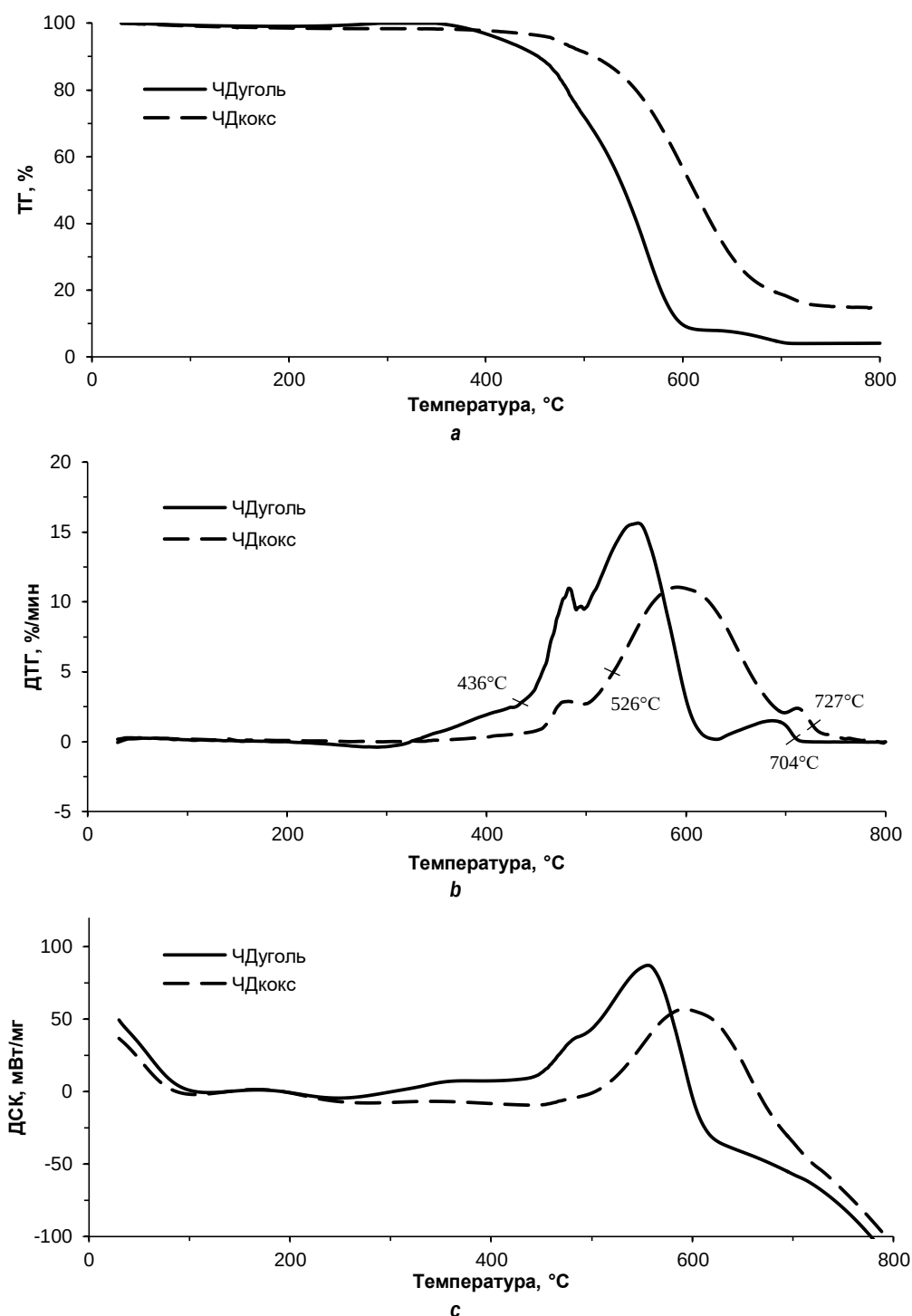


Рис. 4. Горение Чаданского угля и карбонизата: а – термогравиметрический анализ;
b – дифференциально-термогравиметрический анализ; c – дифференциальная сканирующая калориметрия
Fig. 4. Combustion of Chadansky coal and carbonizate: a – thermal gravimetric analysis; b – differential thermal gravimetric analysis; c – differential scanning calorimetry

экзотермическим пиком на кривой ДСК (см. рис. 4 с) с максимальной интенсивностью теплового потока 37 мВт/мг. Основной (второй) пик ДТГ (см. рис. 4 б) с максимальной скоростью реакции 26%/мин находится в интервале температур 545–555°C. При этом происходит горение основного коксового остатка, сопровождающееся экзотермическим пиком на кривой ДСК (см. рис. 4 с) с максимальной интенсивностью теплового потока 87 мВт/мг. Третий пик ДТГ (см. рис. 4 б), демонстрирующий догорание особо плотного углеродного остатка, находится в области более высоких температур – 630–720°C, при этом экзотермических пиков на кривой ДСК (см. рис. 4 с) не наблюдается.

Воспламенение и горение коксового остатка карбонизата, полученного из Чаданского угля, происходит в области более высоких температур, чем у Чаданского угля из-за низкого содержания летучих. Температура воспламенения $\text{ЧД}_{\text{кокс}}$ равна 526°C, темпера-

тура выгорания составила 727°C. Убыль массы почти отсутствует в интервале температур 25–400°C (см. рис. 4 а). В процессе горения $\text{ЧД}_{\text{кокс}}$ профиль кривой ДТГ отображает три основных пика (см. рис. 4 б). Первый незначительный пик ДТГ (рис. 4 б) с максимальной скоростью реакции 3%/мин находится в интервале температур 450–490°C и отражает горение малого количества летучих веществ. Основной (второй) пик ДТГ с максимальной скоростью реакции 11%/мин (см. табл. 2) находится в области более высоких температур – 580–595°C, отражая горение коксового остатка (см. рис. 4 б). Третий пик ДТГ с максимальной скоростью реакции 2%/мин находится в области температур 700–715°C, отражая догорание особо плотного углеродного остатка. Процесс горения карбонизата из Чаданского угля, как и у термококса из Каа-Хемского угля, имеет затяжной характер с широким температурным диа-

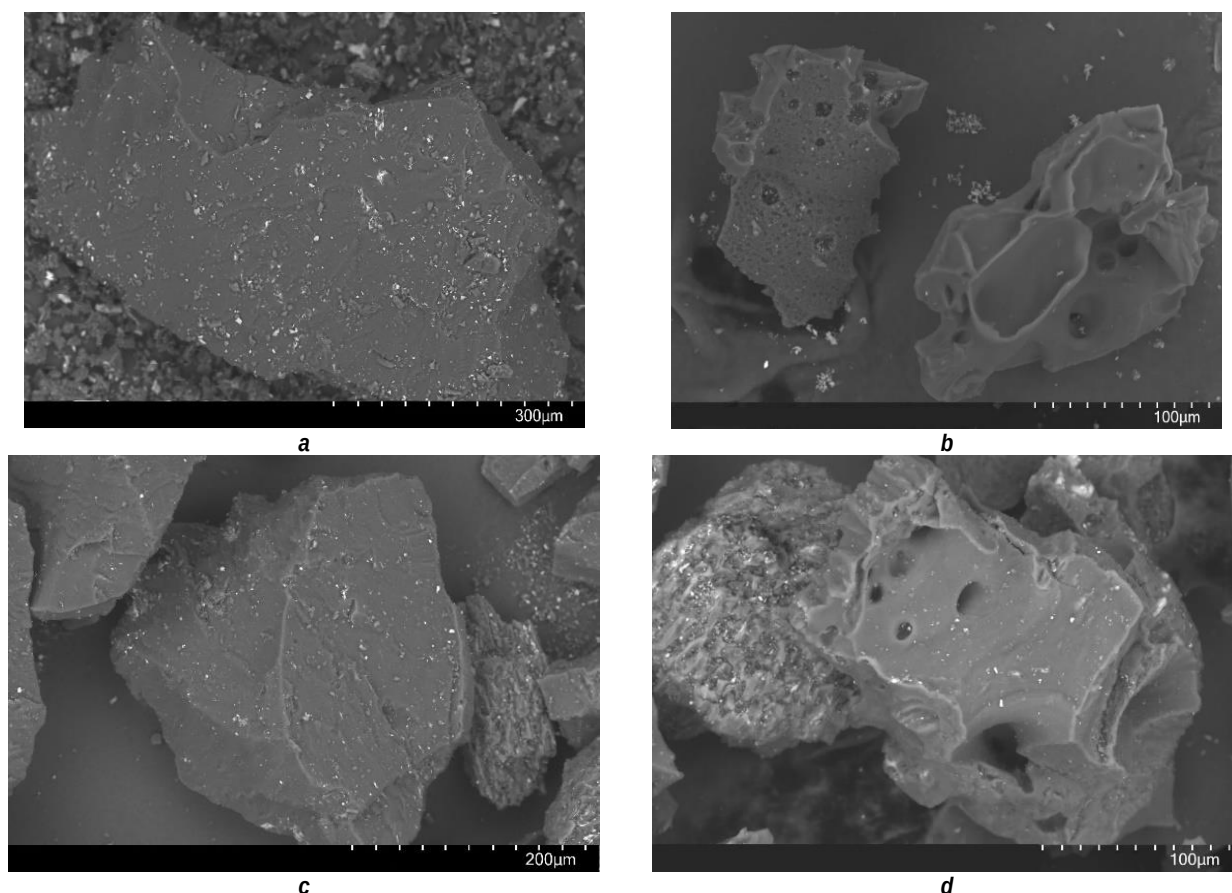


Рис. 5. Изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) угольных частиц: а – Каа-Хемский уголь; б – карбонизат из Каа-Хемского угля; с – Чаданский уголь; d – карбонизат из Чаданского угля

Fig. 5. Scanning electron microscopy (SEM) images of coal particles: a – Kaa-Khemsky coal; b – Kaa-Khemsky coal carbonizate; c – Chadansky coal; d – Chadansky coal carbonizate

пазоном (рис. 4 *b*), а $ДТГ_{max}$ основного пика снизился по сравнению с Чаданским углем на 135%.

На рис. 5 представлены изображения СЭМ, на которых частицы различных видов топлив. На поверхности карбонизатов (рис. 5 *b*, *d*) видны поры крупного диаметра, пронизывающие глубоко внутрь топливную частицу, в отличие от углей до их карбонизации. Угли до карбонизации имеют более гладкую поверхность с порами и трещинами малых размеров (рис. 5 *a* и 5 *c*). Карбонизат имеет развитую пористую структуру, так как в процессе термического воздействия на уголь из него удаляются летучие компоненты, образуются дополнительные трещины и отверстия (рис. 5 *b* и 5 *d*). Поверхность частицы играет важную роль в процессе горения, так как через поры, каналы и трещины кислород может быстрее проникать внутрь частицы и взаимодействовать с углеродом. При неизотермическом нагреве топлива основное влияние на температуру воспламенения оказывает количество летучих компонентов в нем: чем выше количество летучих, тем ниже температура воспламенения топлива. Воспламенение и горение углей, в отличие от карбонизатов, начинается в области более низких температур (см. рис. 3 *b* и 4 *b*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен термогравиметрический анализ горения каменных углей различных месторождений, расположенных на территории Республики Тыва, до и после их карбонизации.

Установлено, что:

1. Основным параметром, влияющим на температуру воспламенения в условиях неизотермического нагрева, является содержание летучих компонентов в топливах. Пористость топливных частиц играет второстепенное значение.

2. Установлено, что температура воспламенения у карбонизатов увеличилась по сравнению с исходным углем до 20%. Температура выгорания у Каа-Хемского угля до и после его карбонизации не изменилась. Температура выгорания коксового остатка карбонизата, полученного из Чаданского угля, увеличилась на 3% по сравнению с исходным углем.

3. Процесс горения карбонизата имеет затяжной характер с широким температурным диапазоном по сравнению с горением исходных углей. Снижение максимальной скорости ρ в основных пиках ДТГ у карбонизата из Каа-Хемского угля составило 90%, у карбонизата из Чаданского угля – 136%.

Список источников

1. Лебедев Н. И. Угли Тувы: Состояние и перспективы освоения сырьевой базы. Кызыл: Изд-во ТувИКОПР СО РАН, 2007. 180 с.
2. Монгуш Г. Р. Исследование изменения технических показателей и химических свойств (методом ИК-спектрального анализа) угольных смесей тувинских месторождений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 12-1. С. 157–162. <https://doi.org/10.17513/mjpf.12973>.
3. Chen Yixin, Lee Soonho, Tahmasebi A., Bai Jin, Vongsivut Jitraporn, Yu Jitraporn. Chemical structure transformation during the later stage of plastic layers during coking using synchrotron infrared microspectroscopy technique // Fuel. 2020. Vol. 273. P. 117764. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117764>.
4. Chen Yixin, Lee Soonho, Tahmasebi A., Liu Mengjie, Zhang Tingting, Bai Jin, et al. Mechanism of carbon structure transformation in plastic layer and semi-coke during coking of Australian metallurgical coals // Fuel. 2022. Vol. 315. P. 123205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123205>.
5. Filippov S. P., Keiko A. V. Coal gasification: at the crossroad. Technological factors // Thermal Engineering. 2021. Vol. 68. P. 209–220. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030046>.
6. Loginov D. A., Chernykh A. P., Islamov S. R. An experimental study of the effect of pressure on the process of brown coal semicoking // Solid Fuel Chemistry. 2021. Vol. 55. Iss. 2. P. 129–132. <https://doi.org/10.3103/S036152192102004X>.
7. Zhuikov A. V., Matyushenko A. I., Panfilov V. I. Nastevich O. E. Experience of using synthetic gas as the main fuel in an industrial heating boiler house // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 55. Iss. 1. P. 92–95. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01325-z>.
8. Yang Yu, Lu Xiaofeng, Wang Quanhai. Investigation on the co-combustion of low calorific oil shale and its semi-coke by using thermogravimetric analysis // Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 136. P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.006>.
9. Zhang Xiaoyu, Zhu Shujun, Zhu Jianguo, Lyu Qinggang, Wei Kai, Huang Qian, et al. TG-MS study on co-combustion characteristics and coupling mechanism of coal gasification fly ash and coal gangue

by ECSA® // *Fuel*. 2022. Vol. 314. P. 123086. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123086>.

10. Zhang Jinping, Jia Xiaowei, Wang Chang'an, Zhao Nan, Wang Pengqian, Che Defu. Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // *Fuel*. 2019. Vol. 247. P. 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.045>.

11. Yao Huifeng, He Boshu, Ding Guangchao, Tong Wenxiao, Kuang Yucheng. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 156. P. 708–721. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115>.

12. Larina O. M., Sinelshchikov V. A., Sytchev G. A. Thermogravimetric analysis of fuel blends of biomass and high-ash coal-containing waste // *High Temperature*. 2020. Vol. 58. Iss. 5. P. 710–715. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20050041>.

13. Zheng Shaowei, Hu Yingjie, Wang Zhiqiang, Cheng Xingxing. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // *Journal of the Energy Institute*. 2020. Vol. 93. Iss. 4. P. 1373–1381. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.12.007>.

14. Hu Lilin, Zhang Yang, Chen Denggao, Fang Jugang, Zhang Man, Wu Yuxin, et al. Experimental study on the combustion and NO_x emission characteristics of a bituminous coal blended with semi-coke // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 160. P. 113993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113993>.

15. Zhao Ruidong, Qin Jianguang, Chen Tianju, Wu Jinhu. TG-FTIR study on co-combustion of bituminous coal semicoke and lignite // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 1849–1858. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10405-7>.

16. Xiao Zhongzheng, Wang Shuzhong, Luo Ming, Cai

Jianjun. Combustion characteristics and synergistic effects during co-combustion of lignite and lignocellulosic components under oxy-fuel condition // *Fuel*. 2022. Vol. 310. Part B. P. 122399. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122399>.

17. Wang Guangwei, Zhang Jianliang, Shao Jiugang, Liu Zhengjian, Zhang Guohua, Xu Tao, et al. Thermal behavior and kinetic analysis of co-combustion of waste biomass/low rank coal blends // *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 124. P. 414–426. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.045>.

18. Deng Shuanghui, Tan Houzhang, Wei Bo, Wang Xuebin, Yang Fuxin, Xiong Xiaohe. Investigation on combustion performance and ash fusion characteristics of Zhundong coal co-combustion with coal gangue // *Fuel*. 2021. Vol. 294. P. 120555. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120555>.

19. Zhang Kaihua, Zhang Kai, Cao Yan, Pan Wei-ping. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses // *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 131. P. 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.163>.

20. Oladejo J. M., Adegbite S., Pang Cheng Heng, Liu Hao, Parvez A. M., Wu Tao. A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass // *Applied Energy*. 2017. Vol. 188. P. 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.005>.

21. Chen Lichun, Wen Chang, Wang Wenyu, Liu Tianyu, Liu Enze, Liu Haowen, et al. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 161. P. 867–877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.148>.

References

1. Lebedev N. I. *Tuvianian Coals*. Kyzyl: Tuvianian Institute for Exploration of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007, 180 p. (In Russ.).
2. Mongush G. R. *Study of changes in specifications and chemical properties (using IR spectral analysis) of coal mixtures from Tuva deposits*. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Basic Research*. 2019;12-1:157-162. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/mjpf.12973>.
3. Chen Yixin, Lee Soonho, Tahmasebi A., Bai Jin, Vongsvivut Jitraporn, Yu Jitraporn. Chemical structure transformation during the later stage of plastic layers during coking using synchrotron infrared microspectroscopy technique. *Fuel*. 2020;273:117764. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117764>.
4. Chen Yixin, Lee Soonho, Tahmasebi Arash, Liu Mengjie, Zhang Tingting, Bai Jin, et al. Mechanism of carbon structure transformation in plastic layer and semi-coke during coking of Australian metallurgical coals. *Fuel*. 2022;315:123205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123205>.
5. Filippov S. P., Keiko A. V. Coal gasification: at the crossroad. Technological factors. *Thermal Engineering*. 2021;68:209-220. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030046>.
6. Loginov D. A., Chernykh A. P., Islamov S. R. An experimental study of the effect of pressure on the process of brown coal semicoking. *Solid Fuel Chemistry*. 2021;55(2):129-132. <https://doi.org/10.3103/S036152192102004X>.
7. Zhuikov A. V., Matyushenko A. I., Panfilov V. I. Nastevich O. E. Experience of using synthetic gas as the main fuel in an industrial heating boiler house. *Power Technology and Engineering*. 2021;55(1):92-95. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01325-z>.
8. Yang Yu, Lu Xiaofeng, Wang Quanhai. Investigation on the co-combustion of low calorific oil shale and its semi-coke by using thermogravimetric analysis. *Energy Conversion and Management*. 2017;136:99-107. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.006>.
9. Zhang Xiaoyu, Zhu Shujun, Zhu Jianguo, Lyu Qinggang, Wei Kai, Huang Qian, et al. TG-MS study on co-combustion characteristics and coupling mechanism of coal gasification fly ash and coal gangue by ECSA®. *Fuel*. 2022;314:123086.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123086>.

10. Zhang Jinping, Jia Xiaowei, Wang Chang'an, Zhao Nan, Wang Pengqian, Che Defu. Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *Fuel*. 2019;247:87-96.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.045>.

11. Yao Huifeng, He Boshu, Ding Guangchao, Tong Wenxiao, Kuang Yucheng. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal. *Applied Thermal Engineering*. 2019;156:708-721. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115>.

12. Larina O. M., Sinelshchikov V. A., Sytchev G. A. Thermogravimetric analysis of fuel blends of biomass and high-ash coal-containing waste. *High Temperature*. 2020;58(5):710-715.

<https://doi.org/10.1134/S0018151X20050041>.

13. Zheng Shaowei, Hu Yingjie, Wang Zhiqiang, Cheng Xingxing. Experimental investigation on ignition and burn-out characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *Journal of the Energy Institute*. 2020;93(4):1373-1381. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.12.007>.

14. Hu Lilin, Zhang Yang, Chen Denggao, Fang Jugang, Zhang Man, Wu Yuxin, et al. Experimental study on the combustion and NO_x emission characteristics of a bituminous coal blended with semi-coke. *Applied Thermal Engineering*. 2019;160:113993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113993>.

15. Zhao Ruidong, Qin Jianguang, Chen Tianju, Wu Jinhui. TG-FTIR study on co-combustion of bituminous coal semicoke and lignite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147:1849-1858. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10405-7>.

16. Xiao Zhongzheng, Wang Shuzhong, Luo Ming, Cai

Jianjun. Combustion characteristics and synergistic effects during co-combustion of lignite and lignocellulosic components under oxy-fuel condition. *Fuel*. 2022;310(B):122399.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122399>.

17. Wang Guangwei, Zhang Jianliang, Shao Jiugang, Liu Zhengjian, Zhang Guohua, Xu Tao, et al. Thermal behavior and kinetic analysis of co-combustion of waste biomass/low rank coal blends. *Energy Conversion and Management*. 2016;124:414-426. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.045>.

18. Deng Shuanghui, Tan Houzhang, Wei Bo, Wang Xuebin, Yang Fuxin, Xiong Xiaohe. Investigation on combustion performance and ash fusion characteristics of Zhundong coal co-combustion with coal gangue. *Fuel*. 2021;294:120555.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120555>.

19. Zhang Kaihua, Zhang Kai, Cao Yan, Pan Wei-ping. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses. *Bioresource Technology*. 2013;131:325-332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.163>.

20. Oladejo J. M., Adegbite S., Pang Cheng Heng, Liu Hao, Parvez A. M., Wu Tao. A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass. *Applied Energy*. 2017;188:215-225. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.005>.

21. Chen Lichun, Wen Chang, Wang Wenyu, Liu Tianyu, Liu Enze, Liu Haowen, et al. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal. *Renewable Energy*. 2020;161:867-877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.148>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуйков Андрей Владимирович,

кандидат технических наук,
заведующий учебно-научной лабораторией кафедры
теплотехники и гидрогазодинамики,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского 26а,
Россия

Логинов Дмитрий Александрович,

кандидат технических наук,
начальник управления НИОКР,
Сибирский научно-исследовательский институт
углеобогащения,
660060, г. Красноярск, ул. Ады Лебедевой, 64а,
Россия

Монгуш Григорий Романович,

научный сотрудник,
Тувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов СО РАН,
667007, Республика Тыва, г. Кызыл,
ул. Интернациональная, 117а, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrei V. Zhuikov,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Educational and Scientific Laboratory
of the Department of Heat Engineering and Fluid
Gas Dynamics,
Siberian Federal University,
26a, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk 660074,
Russia

Dmitry A. Loginov,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Research and Development Department,
Siberian Research Institute of Coal Concentration,
64a, Ada Lebedeva St., Krasnoyarsk 660060, Russia

Grigory R. Mongush,

Researcher,
Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources
of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences,
117a, Internatsionalnaya St., Kyzyl, Tyva Republic,
667007, Russia

Чичерин Станислав Викторович,
аспирант,
Омский государственный университет путей
сообщений,
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, Россия

Stanislav V. Chicherin,
Postgraduate,
Omsk State Transport University,
35, Marksa St., Omsk 644046, Russia

Землянский Николай Алексеевич,
студент,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26а,
Россия

Nikolai A. Zemlyansky,
Student,
Siberian Federal University,
26a, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk 660074,
Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 01.06.2022.

Information about the article

The article was submitted 03.02.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 01.06.2022.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.314

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-284-296>

Исследование режимов работы технологического комплекса электропривод–турбомеханизм–трубопроводная магистраль

Владимир Евгеньевич Павлов^{1✉}¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия¹pview52@mail.ru

Резюме. Цель работы – разработка математической модели технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль. Анализ пусковых режимов проводился методом нелинейного дифференциального исчисления и графоаналитическим методом. Расчеты выполнялись на моделях с применением программного комплекса MATLAB. Рассчитаны переходные процессы по расходу и напору, коэффициентам полезного действия механизма насоса и всей насосной установки, по току статора, угловой частоте и моменту вращения асинхронного двигателя при пуске насоса и увеличении коэффициента сопротивления трубопроводной магистрали в 2, в 5, в 10 и в 1000 раз. Исследования показали, что при увеличении коэффициента сопротивления магистрали в 10 раз производительность насоса снижается в 2,8 раза; напор возрастает в 1,28 раза; момент, ток статора и скорость асинхронного двигателя изменяются незначительно: момент и ток уменьшаются в 1,167 и 1,034 раза, соответственно, а скорость возрастает в 1,0046 раза; коэффициенты полезного действия механизма насоса и всей насосной установки (с учетом двигателя) снижаются в 1,78 и в 1,89 раза, соответственно. Время пуска двигателя насоса составляет 0,5 с, максимальный ток статора при пуске в 4,39 раза превышает номинальное значение, установившееся значение тока статора не более 59,3% от номинального. Установлено, что разработанная математическая модель технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль для насоса позволяет получить количественные оценки эксплуатационных и энергетических параметров установки при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Ключевые слова: турбомеханизмы, асинхронный двигатель, напор и подача, трубопроводная магистраль, модель электропривода

Для цитирования: Павлов В.Е. Исследование режимов работы технологического комплекса электропривод–турбомеханизм–трубопроводная магистраль // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 284–296. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-284-296>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Study of operational modes of an "electric drive–turbomachinery–pipeline" technological complex

Vladimir E. Pavlov^{1✉}¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹pview52@mail.ru

Abstract. A developed mathematical model of an asynchronous motor – turbomachinery pipeline technological complex is presented. An analysis of starting conditions is carried out by a nonlinear differential calculus and graphic analytical method. The calculations for the model were performed using the MATLAB software package. The flow, head, efficiency of the pump mechanism and entire pump unit, stator current, angular frequency and torque of the asynchronous motor were calculated at pump start-up and with an increase of pipeline resistance coefficient by 2, 5, 10, and 1000 times. At an increase in the pipeline resistance coefficient by 10 times, the pump efficiency is shown to be reduced by 2.8 times, while the head is increased by 1.28 times; meanwhile, the torque, stator current, and rotational speed of the asynchronous motor change insignificantly. The torque and current decrease by 1.167 and 1.034 times, respectively, while

the speed increases by 1.0046 times; the efficiency of the pump mechanism and pump assembly (including motor) decreases by 1.78 and 1.89 times, respectively. The start-up time of the pump motor equals 0.5 s; the maximum stator current at start-up exceeds the nominal value by 4.39 times; the steady-state stator current comprises no more than 59.3% of the nominal value. The developed mathematical model of the asynchronous motor – turbomachinery – pipeline technological complex is established to allow the operational and energy parameters of the unit to be quantitatively estimated at start-up, while the pump capacity is capable of being controlled by throttling.

Keywords: turbomechanisms, induction motor, head and feed, pipeline, electric drive model

For citation: Pavlov V. E. Study of operational modes of an "electric drive–turbomachinery–pipeline" technological complex. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):284-296. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-284-296>.

ВВЕДЕНИЕ

Электропривод турбомеханизмов (насосов, вентиляторов, дымососов, аппаратов воздушного охлаждения, компрессоров) потребляет по различным оценкам от 25% до 30% вырабатываемой в мире электроэнергии [1, 2]. Поэтому достоверное математическое описание процессов, происходящих в электроприводах турбомеханизмов, является экономически целесообразной задачей. Вопросы управления производительностью турбомеханизмов с целью энергосбережения проанализированы в работах многих авторов [3–9]. Особенности решения таких задач рассматриваются в различных литературных источниках [10–17].

Цель работы – получить количественную оценку эксплуатационных и энергетических параметров технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль при управлении производительностью методом дросселирования.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для разработки математических моделей устройств технологической схемы электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль воспользуемся подходами, изложенными в [18].

Режимы работы электроприводов определяются в соответствии с уравнением движения:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где M – вращающий момент, развиваемый двигателем, нм; M_c – момент сил сопротивления на валу двигателя, нм; J – суммарный

момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг·м²; ω – угловая частота вращения двигателя, рад/с; $J \frac{d\omega}{dt}$ – динамический момент электропривода, нм.

В зависимости от соотношения между моментами M и M_c возможны следующие режимы работы электропривода:

– при $M > M_c$ $d\omega/dt > 0$, то есть имеет место режим разгона электропривода (динамический режим);

– при $M < M_c$ $d\omega/dt < 0$ также имеет место режим торможения электропривода (динамический режим);

– при $M = M_c$ $d\omega/dt = 0$, в этом случае электропривод работает в установившемся режиме (статический режим).

Рабочая точка электропривода в установившемся режиме определяется как точка пересечения механической характеристики двигателя и механической характеристики производственного механизма. На рис. 1 а показана механическая характеристика асинхронного двигателя и производственного механизма при постоянном моменте сопротивления M_c . Причем в точке а будет устойчивый режим работы электропривода, а в точке в – неустойчивый.

Ниже будут рассмотрены более подробно характеристики, представленные на рис. 1 б, где H_c – статический напор в трубопроводной магистрали, Па; Q – объемная производительность механизма (расход), м³/ч.

Для турбомеханизмов на основании закона постоянства момента движения может быть записано следующее уравнение:

$$H - H_{\text{МАГ}} = \frac{1}{A_1} \frac{dQ}{dt}, \quad (2)$$

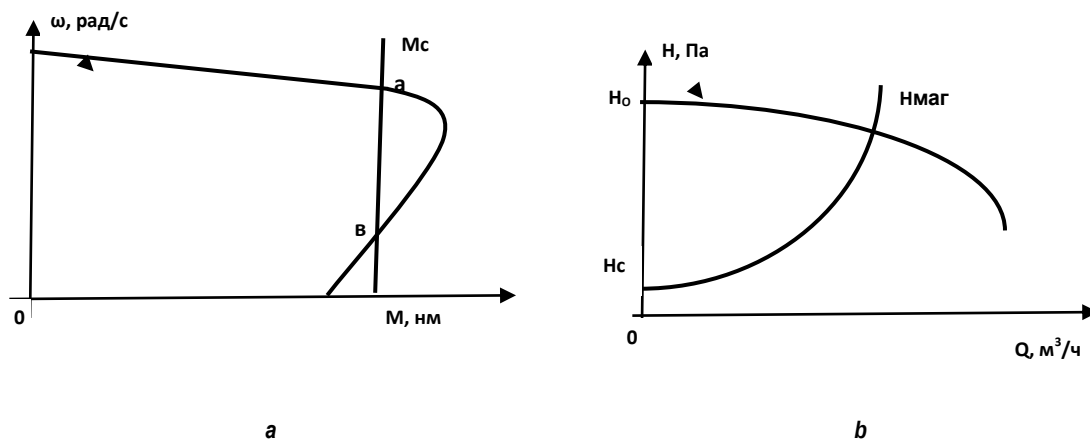


Рис. 1. Механические характеристики асинхронного двигателя и приводимого им механизма (а) и QH-характеристики турбомеханизма и характеристики трубопроводной магистрали (б)
Fig. 1. Mechanical characteristics of the induction motor and the mechanism driven by it (a), turbomechanism QH-characteristics and pipeline characteristics (b)

где H – напор (давление) на входе механизма, Па; H_{mag} – характеристика трубопроводной магистрали, Па; $1/A_1$ – масса жидкости в трубопроводной магистрали, кг; $\frac{1}{A_1} \frac{dQ}{dt}$ – динамический напор в трубопроводной магистрали. Конструктивно-технологический параметр A_1 определяется выражением:

$$A_1 = \frac{S}{L\gamma}, \quad (3)$$

где $S = \pi d^2/4$ – эквивалентная площадь поперечного сечения трубопроводной магистрали, м²; d – эквивалентный диаметр трубопроводной магистрали, м; L – эквивалентная длина трубопроводной магистрали, м; γ – плотность перекачиваемой жидкости или газа, кг/м³.

В зависимости от соотношения между напорами H и H_{mag} возможны следующие режимы работы турбомеханизма:

- при $H > H_{\text{mag}}$ $dQ/dt > 0$, то есть имеет место режим разгона турбомеханизма (динамический режим);
- при $H < H_{\text{mag}}$ $dQ/dt < 0$ также имеет место режим торможения турбомеханизма (динамический режим);
- при $H = H_{\text{mag}}$ $dQ/dt = 0$, в этом случае турбомеханизм работает в установившемся режиме (статический режим).

Рабочая точка турбомеханизма в устано-

вившемся режиме определяется как точка пересечения QH-характеристики турбомеханизма и характеристики трубопроводной магистрали (рис. 1 б).

Естественная напорная характеристика приводится в технических паспортах турбомеханизмов в виде графической зависимости: $Q = f(H)$. Для удобства анализа напорные характеристики турбомеханизмов аппроксимируют аналитической зависимостью. Для «типовой» QH-характеристики одной из таких аналитических зависимостей является соотношение [19, 20]:

$$H = H'_{0e} - K \cdot Q^2, \quad (4)$$

где $H'_{0e} = H_{0e} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 = K_1 \omega^2$, то есть

$$K_1 = \frac{H_{0e}}{\omega_H^2}; H_{0e} - \text{давление на выходе турбо-}$$

механизма при нулевой производительности на естественной характеристике, Па; K – постоянный коэффициент для данного турбомеханизма; ω_H – номинальное значение частоты вращения механизма, рад/с.

Коэффициент K можно найти из напорной характеристики (4) при $H = 0$. В этом случае

$$Q = Q_{\text{макс}} \text{ и } K = \frac{H_{0e}}{Q_{\text{макс}}^2}.$$

В работе [20] показано, что для турбомеханизма с напорной характеристикой вида (4) номинальному режиму соответствует точка с координатами $Q = \frac{Q_{\max}}{\sqrt{3}}$, $H = \frac{2}{3} H_{0e}$. Если обозначить эти значения как Q_H и H_H , то (4) запишется в следующем виде:

$$H = 1,5H_H - \frac{1,5H_H}{(\sqrt{3}Q_H)^2} Q^2 = 1,5H_H - 0,5 \frac{H_H}{Q_H^2} Q^2 = K_H H_H - K_Q \frac{H_H}{Q_H^2} Q^2,$$

где K_H – коэффициент напора; H_H – номинальное значение напора; Q_H – номинальное значение расхода; K_Q – коэффициент расхода.

То есть в рассматриваемом случае $K_H = 1,5$ и $K_Q = 0,5$; если для реальной напорной характеристики известно значение $K_H \neq 1,5$, то значение коэффициента K_Q можно определить из соотношения:

$$K_H - K_Q = 1.$$

Теперь рассмотрим уравнение трубопроводной магистрали с учетом статического напора:

$$H_{\text{маг}} = H_c + (A_2/A_1) Q^2, \quad (5)$$

где H_c – статический напор в трубопроводной магистрали.

Коэффициент сопротивления магистрали A_2 может быть рассчитан по паспортным данным турбомеханизма для рабочей точки $H = H_H$ и $Q = Q_H$:

$$A_2 = \frac{A_1(H_H - H_c)}{Q_H^2}.$$

Если преобразовать уравнение (2) по Лапласу, то при использовании уравнения (2)–(5) можно получить модель турбомеханизма, показанную на рис. 2. Зададимся параметрами реального насоса и трубопроводной магистрали.

Технические и расчетные данные насоса и трубопроводной магистрали: тип насоса SA075T; $Q_H = 4680 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H_H = 9,8 \text{ м}$, $H_c = 0 \text{ м}$, $\omega_H = 293 \text{ 1/с}$, $d = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$, $L = 10 \text{ м}$, $S = 0,0019625 \text{ м}^2$, $K = 177,5147 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$, $K_1 = 1,4543 \text{ Па} \cdot \text{с}^2$, $A_1 = 19,625 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $A_2 = 11522,574 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{кг} \cdot \text{м}^3$.

На рис. 3 представлены естественная напорная характеристика насоса и характеристика трубопроводной магистрали, полученные с помощью графопостроителя.

Необходимо получить количественную оценку эксплуатационных и энергетических параметров технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль при управлении производительностью методом дросселирования, что и является нашей целью.

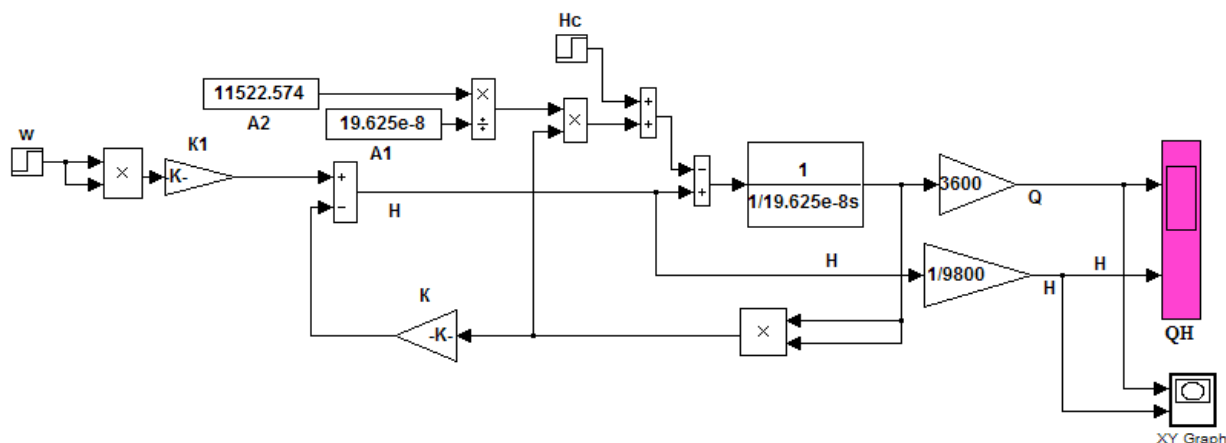


Рис. 2. Модель турбомеханизма с трубопроводной магистралью
Fig. 2. Model of a turbomechanism with a pipeline

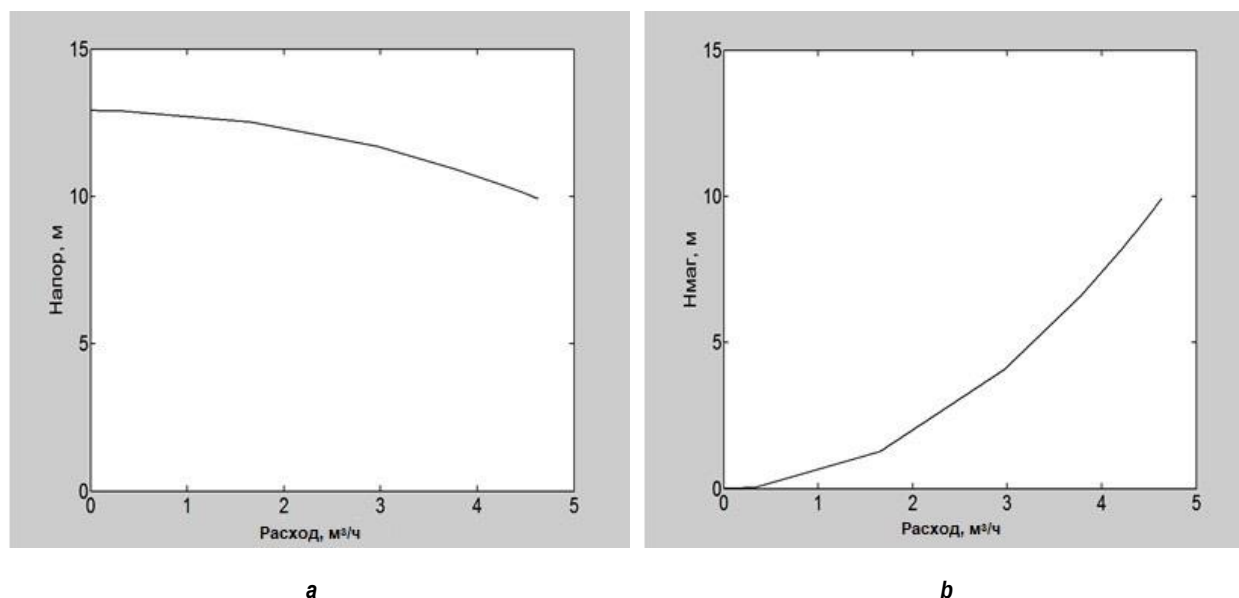


Рис. 3. Естественная напорная характеристика насоса (а) и характеристика трубопроводной магистрали (b)
Fig. 3. Natural head-capacity curve of the pump (a) and pipeline characteristic (b)

МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ–ТУРБОМЕХАНИЗМ–ТРУБОПРОВОДНАЯ МАГИСТРАЛЬ

Модель турбомеханизма может быть представлена структурой, показанной на рис. 4. Входным параметром модели является угловая скорость приводного двигателя, выходным параметром – расход насоса. Пропорциональный квадрату скорости сигнал сравнивается с сигналом внутренней обратной связи, пропорциональным квадрату расхода. Разность этих сигналов определяет величину напора механизма H , который сравнивается с напором в трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}}$, разность этих сигналов подается на вход интегрирующего звена, учитывающего инерционность трубопроводной магистрали.

Отсюда следует, что аналогом вращающего момента M электропривода является напор H турбомеханизма, момент сил сопротивления M_C электропривода подобен сопротивлению трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}}$, аналогом скорости вращения электропривода ω является расход Q турбомеханизма. Режимы работы турбомеханизмов (электроприводов) зависят от соотношения между скоростным напором H (движущим моментом M) и силами сопротивления трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}}$ (моментом сил сопротивле-

ния M_C). Длительность механических переходных процессов электроприводов зависит от величины суммарного момента инерции, приведенного к валу двигателя J , для турбомеханизмов длительность этих переходных процессов зависит от длины и диаметра трубопроводной магистрали, а также плотности перемещаемой жидкости или газа.

Расчеты переходных процессов электроприводов можно проводить с помощью обобщенного графо-аналитического метода. Используя рассмотренные выше аналогии, можно применить графо-аналитический метод для расчета времени переходных процессов турбомеханизмов по расходу. Методика такого расчета заключается в следующем:

1. По паспортным данным строится естественная напорная характеристика турбомеханизма в первом квадранте системы координат $Q = f(H)$ (рис. 5).

2. Рассчитывается характеристика трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}} = f(Q)$ и также строится в первом квадранте (см. рис. 5).

3. Уравнение (2) записывается в виде приращений:

$$\frac{\Delta Q}{H - H_{\text{маг}}} = A_1 \Delta t,$$

и выбирается интервал времени Δt .

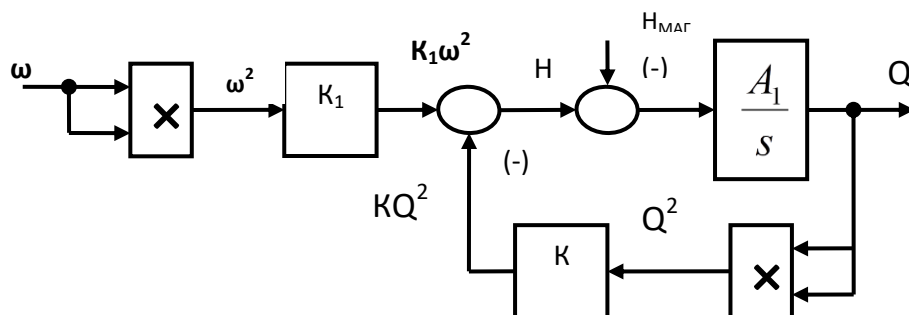


Рис. 4. Структурная схема модели турбомеханизма с трубопроводной магистралью
Fig. 4. Block diagram of a turbomechanism model with a pipeline

4. Рассчитывается тангенс основного угла построения:

$$\operatorname{tg} \alpha = A_1 \Delta t \frac{m_H}{m_Q},$$

где m_H и m_Q – масштабы напора и расхода, соответственно, используемые на рис. 5.

5. Из точки 1 под углом α строится луч до пересечения с характеристикой трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}} = f(Q)$ в точке 2. Значения расхода из этой точки сносятся во второй квадрант на вертикальную линию, соответствующую выбранному интервалу времени Δt .

6. Полученная точка 2'' соответствует

приращению скорости $\Delta \omega$ на первом интервале расчета. Далее из точки 2' под углом α строится луч до пересечения с характеристикой трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}} = f(Q)$ в точке 3 и построения повторяются.

7. Нарастание расхода заканчивается в точке пересечения напорной характеристики турбомеханизма с характеристикой трубопроводной магистрали. Угол α_i на последнем интервале может быть измерен, что позволит рассчитать время работы турбомеханизма на этом интервале:

$$\Delta t_i = \frac{\operatorname{tg} \alpha_i}{A_1} \frac{m_Q}{m_H}.$$

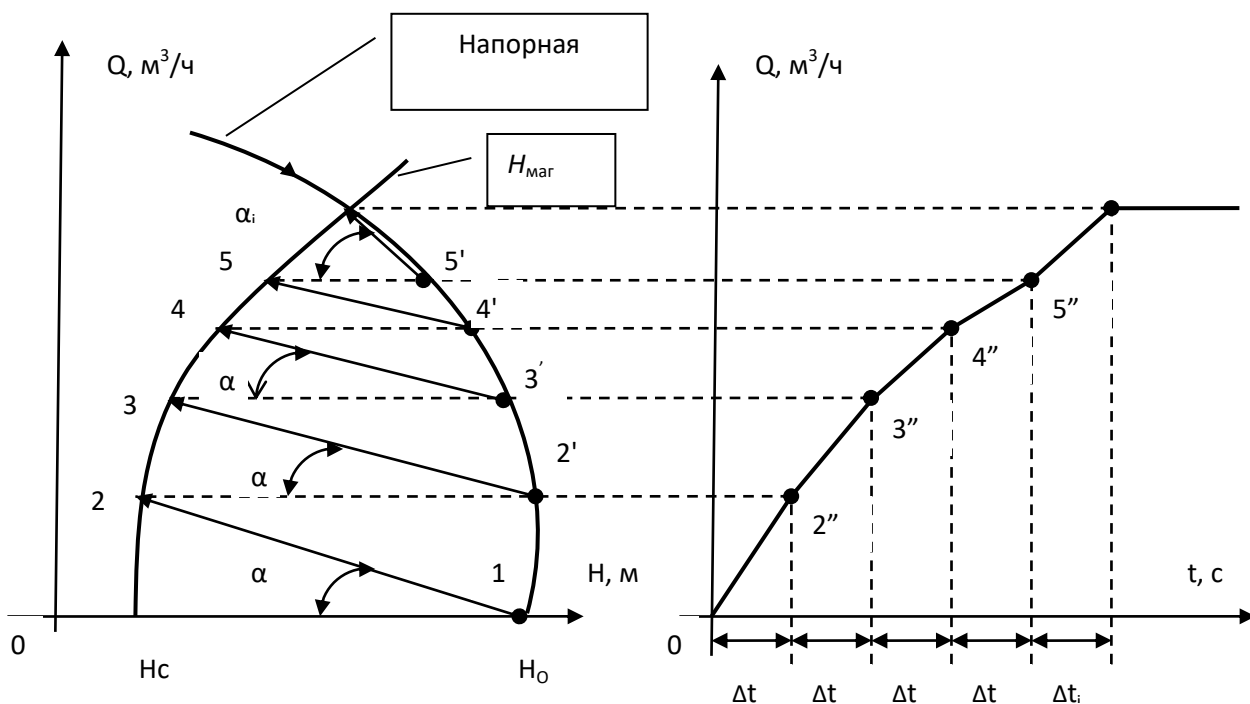


Рис. 5. Методика построения переходного процесса по расходу турбомеханизма
Fig. 5. Building methodology of a transient process of turbomechanism consumption

При учете электромагнитных процессов в электроприводах изменение тока во времени происходит не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, обусловленным величиной электромагнитной инерции обмоток электрических машин.

В турбомеханизмах параметр скорости аналогичен (подобен) параметру тока и величина скорости изменяется не мгновенно, а с обусловленным механической и электромагнитной инерционностью привода запаздыванием.

Для учета этих особенностей работы турбомеханизмов расчетная математическая модель должна включать приводной двигатель.

Модель технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль для насоса SA075T показана на рис. 6. Модель содержит асинхронный двигатель типа 4A63B293 со следующими номинальными данными: $P_n = 0,55$ кВт; $U_n = 230/400$ В; $I_n = 3/1,5$ А; $n_n = 2850$ об/мин; $\eta_n = 0,73\%$; $\cos\phi_n = 0,98$; $R_s = 19,066$ Ом; $R_r = 14,079$ Ом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Были проанализированы полученные осциллограммы по различным параметрам электропривода и турбомеханизма при пуске и управлении производительностью насоса

методом дросселирования.

На рис. 7 показаны переходные процессы по расходу и напору насоса (а) и моменту и мощности сил сопротивления на валу асинхронного двигателя (b) при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Анализ полученных осциллограмм позволяет определить, что при увеличении коэффициента сопротивления магистрали A2:

- производительность (расход) насоса снижается непропорционально: при увеличении A2 в два раза расход уменьшается в 1,33 раза, в пять раз – в два раза, в 10 раз – в 2,8 раза, в 1000 раз – в 27,5 раза;

- напор насоса возрастает непропорционально: при увеличении A2 в два раза напор увеличивается в 1,14 раза, в пять раз – в 1,24 раза, в 10 раз – в 1,28 раза, в 1000 раз – в 1,33 раза;

- момент сил сопротивления на валу двигателя снижается непропорционально: при увеличении A2 в два раза момент уменьшается в 1,07 раза, в пять раз – в 1,16 раза, в 10 раз – в 1,23 раза, в 1000 раз – в 1,43 раза;

- мощность сил сопротивления на валу двигателя снижается непропорционально: при увеличении A2 в два раза мощность уменьшается в 1,07 раза, в пять раз – в 1,16 раза, в 10 раз – в 1,23 раза, в 1000 раз – в 1,42 раза.

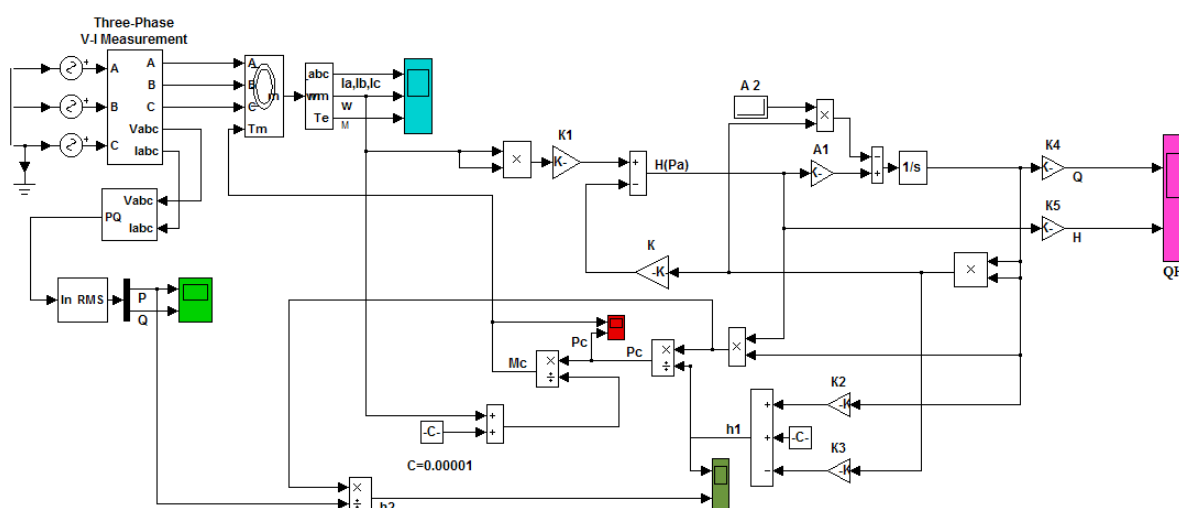


Рис. 6. Модель технологического комплекса асинхронный двигатель–насос–трубопроводная магистраль при управлении производительностью методом дросселирования

Fig. 6. Model of the technological complex induction motor–pump–pipeline under throttling control of pump performance

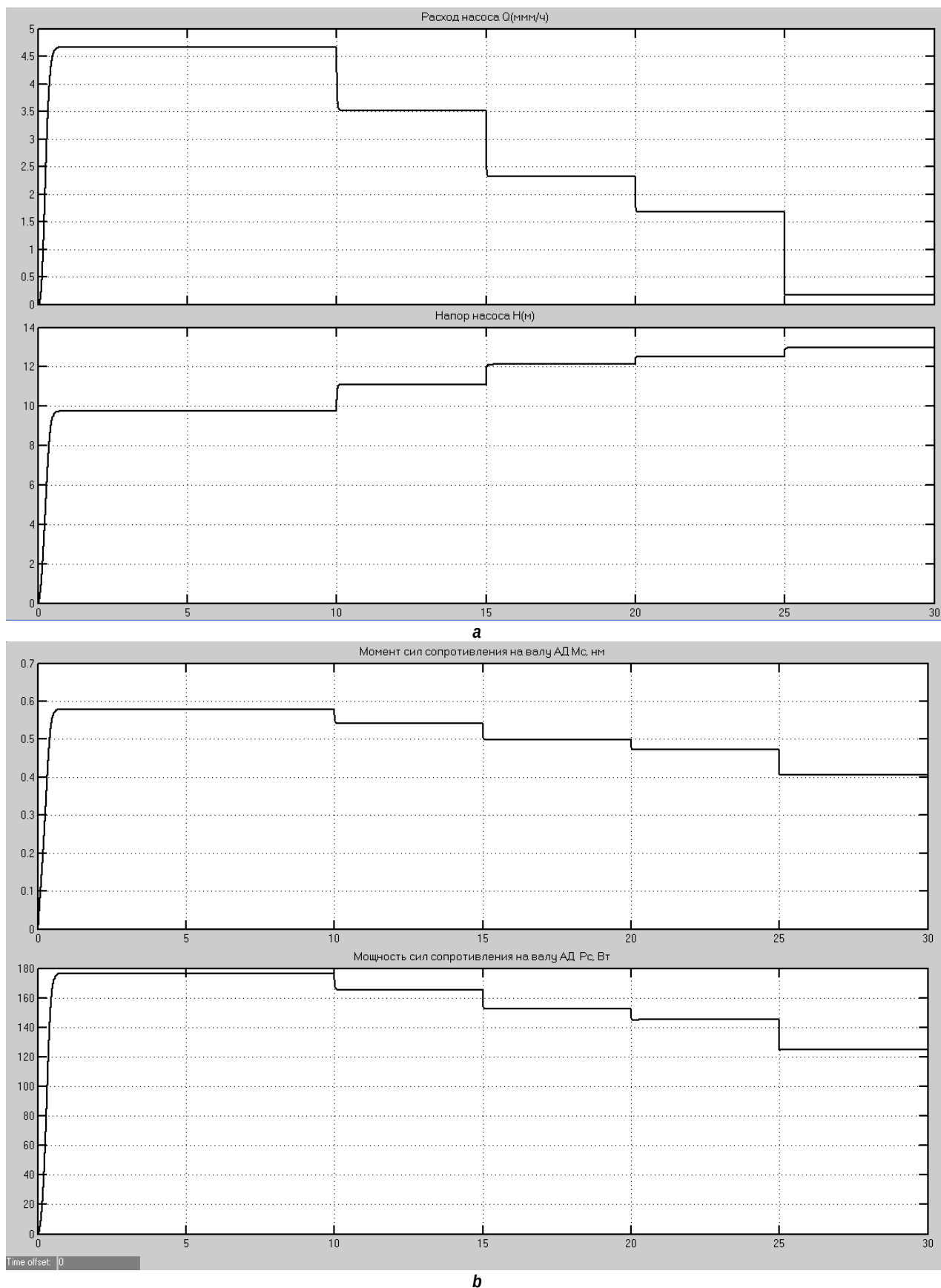


Рис. 7. Переходные процессы по расходу и напору насоса (а) и моменту и мощности сил сопротивления на валу асинхронного двигателя (б) при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования
Fig. 7. Transients of pump flow and head (a), the moment and power of induction motor shaft resistance forces (b) when starting and controlling the pump performance by throttling

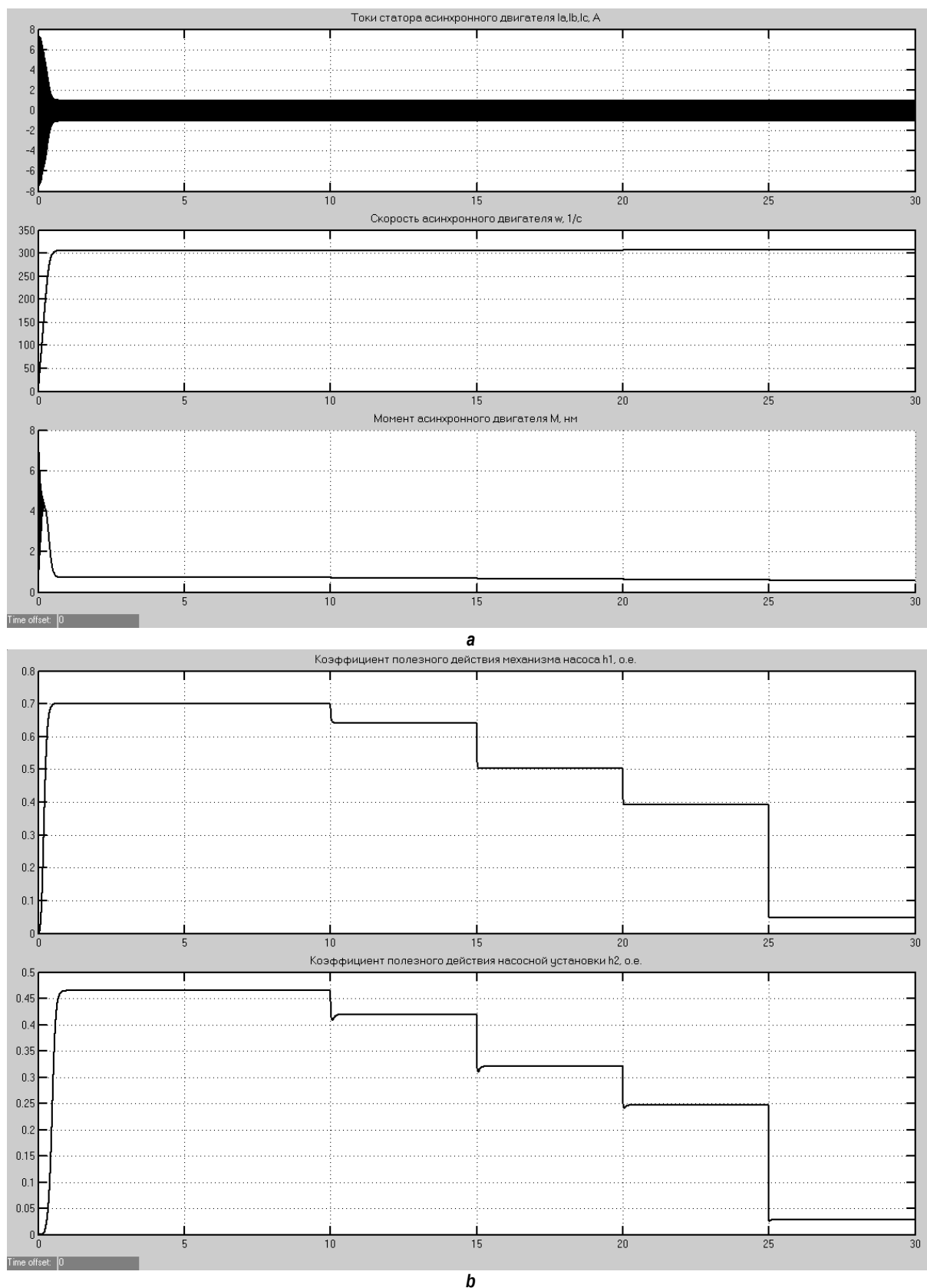


Рис. 8. Переходные процессы по току статора, угловой частоте вращения ω , моменту вращения M асинхронного двигателя (а) и коэффициентам полезного действия механизма насоса и всей насосной установки (б) при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования
Fig. 8. Transients of the stator current, angular rotation frequency ω , torque M of the induction motor (a) and efficiency coefficients of the pump mechanism and entire pumping unit (b) when starting and controlling pump performance by throttling

На рис. 8 показаны переходные процессы по току статора, угловой частоте вращения ω , моменту вращения M асинхронного двигателя (а) и коэффициентам полезного действия механизма насоса и всей насосной установки (б) при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Время пуска двигателя насоса составляет 0,5 с, максимальный ток статора при пуске в 4,39 раза превышает номинальное значение, установившееся значение тока статора не более 59,3% от номинального.

Анализ полученных осциллограмм позволяет определить, что при увеличении коэффициента сопротивления магистрали A_2 :

- ток статора двигателя снижается незначительно: при увеличении A_2 в два раза ток уменьшается в 1,012 раза, в пять раз – в 1,026 раза, в 10 раз – в 1,034 раза, в 1000 раз – в 1,053 раза;

- скорость двигателя возрастает незначительно: при увеличении A_2 в два раза скорость увеличивается в 1,0016 раза, в пять раз – в 1,0034 раза, в 10 раз – в 1,0046 раза, в 1000 раз – в 1,0074 раза;

- момент двигателя снижается незначительно: при увеличении A_2 в два раза момент уменьшается в 1,052 раза, в пять раз – в 1,125 раза, в 10 раз – в 1,167 раза, в 1000 раз – в 1,306 раза;

- коэффициент полезного действия механизма насоса снижается непропорционально: при увеличении A_2 в два раза коэффициент полезного действия уменьшается в 1,09 раза, в пять раз – в 1,39 раза, в 10 раз – в 1,78 раза, в 1000 раз – в 14,5 раза;

- коэффициент полезного действия всей насосной установки (с учетом двигателя) снижается непропорционально: при увеличении A_2 в два раза коэффициент полезного действия уменьшается в 1,1 раза, в пять раз – в 1,45 раза, в 10 раз – в 1,89 раза, в 1000 раз – в 15,5 раза.

При сравнении полученных на моделях с характеристиками экспериментально снятыми на лабораторном стенде характеристик, было определено, что разработанные модели достоверно отображают физические процессы, происходящие в центробежном насо-

се SA075T, приводимом во вращение асинхронным двигателем типа 4A63B293.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использовать при расчетах характеристик турбомеханизмов методик, полученных в теории электропривода. Аналогом вращающего момента M электропривода является напор H турбомеханизма, момент сил сопротивления M_c электропривода подобен сопротивлению трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}}$, аналогом скорости вращения электропривода ω является расход Q турбомеханизма. Режимы работы турбомеханизмов (электроприводов) зависят от соотношения между скоростным напором H (движущим моментом M) и силами сопротивления трубопроводной магистрали $H_{\text{маг}}$ (моментом сил сопротивления M_c). Длительность механических переходных процессов электроприводов зависит от величины суммарного момента инерции, приведенного к валу двигателя J , для турбомеханизмов длительность этих переходных процессов зависит от длины и диаметра трубопроводной магистрали, а также плотности перемещаемой жидкости или газа. В работе представлен простой графоаналитический метод расчета переходных процессов пуска турбомеханизмов по известным статическим характеристикам.

Была разработана модель технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль для насоса SA075T.

Проведено сравнение переходных процессов по различным параметрам электропривода и турбомеханизма при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Исследования показали, что при увеличении коэффициента сопротивления магистрали A_2 в 10 раз производительность насоса снижается в 2,8 раза; напор возрастает в 1,28 раза; момент, ток статора и скорость асинхронного двигателя изменяются незначительно: момент и ток уменьшаются в 1,167 и 1,034 раза, а скорость возрастает в 1,0046 раза; коэффициенты полезного действия механизма насоса и всей насосной установки (с

учетом двигателя) снижаются в 1,78 и в 1,89 раза, соответственно.

Таким образом, разработанная математическая модель технологического комплекса асинхронный двигатель–турбомеханизм–трубопроводная магистраль для насоса позволяет получить количественные оценки эксплуатационных и энергетических параметров

установки при пуске и управлении производительностью насоса методом дросселирования.

Модель может быть использована для исследования работы электропривода и турбомеханизма при различных управляющих и возмущающих воздействиях в питающей сети и трубопроводной магистрали.

Список источников

1. Гоман В. В., Ошурбеков С. Х., Казакбаев В. М., Прахт В. А., Дмитриевский В. А. Сравнение энергопотребления различными электродвигателями, работающими в составе насосного агрегата // *Электротехника и электромеханика*. 2020. № 1. С. 16–24. <http://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.03>.
2. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 6. P. 1144. <http://doi.org/10.3390/en12061144>.
3. Gevorkov L., Rassölkin A., Kallaste A., Vaimann T. Simulink based model of electric drive for throttle valve in pumping application // *19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2018. <http://doi.org/10.1109/EPE.2018.8395996>.
4. Tergemes K. T., Amanbek D. S., Maratova B. M., Zhauyt A. Control system improvement of the electric drive of the pumping unit for oil production // *XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. 2021. <http://doi.org/10.1109/ACED50605.2021.9462275>.
5. Klovov O. A., Pushkina A. A. Modernization of the electric drive and automation system of the sewage pumping station // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. <http://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271382>.
6. Schmehl C., McKinley M., McBride W., Kavanaugh J., Paes R. Adjustable speed drive selection for electric submersible pumps // *IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (San Francisco, 8–10 September 2014)*. San Francisco: IEEE, 2014. P. 201–216. <http://doi.org/10.1109/PCIcon.2014.6961885>.
7. Liang Xiaodong, Ilochonwu O., Adedun R. Dynamic response of variable frequency drives in electrical submersible pump systems // *48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference*. 2012. <http://doi.org/10.1109/ICPS.2012.6229603>.
8. Rachev S., Ivanova G., Koeva D. Y. Vector control of pump unit electric drive with medium voltage induction motor // *12th Electrical Engineering Faculty Conference*. 2020. <http://doi.org/10.1109/BulEF51036.2020.9326032>.
9. Siro B., Săvulescu A., Ianache C. The simulation of crude oil extraction in Canadian pumping with the DTC electric drive in a wide range of operating frequencies // *10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence*. 2018. <http://doi.org/10.1109/ECAI.2018.8678975>.
10. Пантелеев В. И., Пахомов А. Н., Федоренко А. А. Математическое моделирование энерготехнологического комплекса «Питающая сеть – электропривод – насос – трубопровод» // *Электротехника*. 2020. № 10. С. 56–62.
11. Довганюк И. Я., Сокур П. В., Лазарев Г. Б. Особенности электромагнитных и электромеханических процессов пуска тягодутьевых механизмов мощных энергоблоков ТЭС // *Электрические станции*. 2020. № 9. С. 38–49. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2020.1070.9.005>.
12. Мирхаликова Д. С., Дадабаев Ш. Т. Исследование пусковых режимов асинхронного электропривода оросительной насосной станции при пониженном напряжении сети // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 3. С. 303–309.
13. Дадабаев Ш. Т., Рахматов Х. А., Абдумаликов Б. А. Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбомеханизмов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 4. С. 256–262.
14. Крюков О. В. Пуск электроприводных газоперекачивающих агрегатов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2016. № 20. С. 62–83.
15. Tomov P., Aprahamyan B., Petrov K., Andreev P., Petkov P. Experimental survey and analysis on the impact of the commutation process on a positive displacement pump driven by an asynchronous electric motor // *16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems*. 2019. <http://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771523>.
16. Săvulescu, Siro B., Ianache C., Georgescu L. Simulation of the electric drive of a beam pumping unit and its comparative analysis for different operating frequencies // *6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*. 2019. <http://doi.org/10.1109/ISEEE48094.2019.9136112>.
17. Wang Po-Hao, Wen Tsrong-Yi. Effects of electrical driving mode on pressure and flow rate of wire-rod electrohydrodynamic pumps // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 10. No. 4. P. 621–625. <http://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.2978305>.
18. Гонне Г. Г., Павлов В. Е. Математические модели

динамических процессов технологического комплекса «электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль» при управлении его производительностью изменением скорости вращения электропривода // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 121–125.

19. Гоппе Г. Г., Луконин А. А., Павлов В. Е. Управление соотношением топливо-воздух в котлоагрегатах ТЭС при регулировании производительности дутьевых

вентиляторов методом дросселирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 8. С. 156–165.

20. Гоппе Г. Г., Павлов В. Е. Исследование устойчивости работы технологического комплекса электропривод – турбомеханизм – трубопроводная магистраль // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 5. С. 150–158.

References

1. Goman V. V., Oshurbekov S. H., Kazakbaev V. M., Praht V. A., Dmitrievskij V. A. Comparison of energy consumption by various electric motors operating as a part of a pumping unit. *Elektrotehnika i elektromehanika*. 2020;1:16-24. (In Russ.). <http://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.03>.
2. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskij V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications. *Energies*. 2019;12(6):1144. <http://doi.org/10.3390/en12061144>.
3. Gevorkov L., Rassolkin A., Kallaste A., Vaimann T. Simulink based model of electric drive for throttle valve in pumping application. In: *19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2018. <http://doi.org/10.1109/EPE.2018.8395996>.
4. Tergemes K. T., Amanbek D. S., Maratova B. M., Zhauyt A. Control system improvement of the electric drive of the pumping unit for oil production. In: *XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. 2021. <http://doi.org/10.1109/ACED50605.2021.9462275>.
5. Klovov O. A., Pushkina A. A. Modernization of the electric drive and automation system of the sewage pumping station. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. <http://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271382>.
6. Schmehl C., McKinley M., McBride W., Kavanaugh J., Paes R. Adjustable speed drive selection for electric submersible pumps. In: *IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*. 8–10 September 2014, San Francisco. San Francisco: IEEE; 2014, p. 201-216. <http://doi.org/10.1109/PCIcon.2014.6961885>.
7. Liang Xiaodong, Ilochonwu O., Adedun R. Dynamic response of variable frequency drives in electrical submersible pump systems. In: *48th IEEE Industrial & Commercial Power Systems Conference*. 2012. <http://doi.org/10.1109/ICPS.2012.6229603>.
8. Rachev S., Ivanova G., Koeva D. Y. Vector control of pump unit electric drive with medium voltage induction motor. In: *12th Electrical Engineering Faculty Conference*. 2020. <http://doi.org/10.1109/BulEF51036.2020.9326032>.
9. Siro B., Săvulescu A., Ianache C. The simulation of crude oil extraction in Canadian pumping with the DTC electric drive in a wide range of operating frequencies. In: *10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence*. 2018. <http://doi.org/10.1109/ECAI.2018.8678975>.
10. Panteleev V. I., Pahomov A. N., Fedorenko A. A. Mathematical modeling of a power line-electric drive-pump-pipeline power technological complex. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2020;10:56-62. (In Russ.).
11. Dovganyuk I. Ya., Sokur P. V., Lazarev G. B. Features of electromagnetic and electromechanical processes of starting traction mechanisms of powerful thermal power plant units. *Elektricheskie Stantsii = Power Technology and Engineering*. 2020;9:38-49. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2020.1070.9.005>.
12. Mirkhalikova D. S., Dadabaev Sh. T. Research of start-up modes of asynchronous electric drive of irrigating pump station at the reduced voltage of the network. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Tula State University*. 2020;3:303-309. (In Russ.).
13. Dadabaev Sh. T., Rakhmatov Kh. A., Abdumalikov B. A. Research of technological and transition processes of electric drives of turbomechanisms. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Tula State University*. 2017;4:256-262. (In Russ.).
14. Kryukov O. V. Start-up of electrodriving gas-compressor units. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Bulletin of Perm national research polytechnic university. Electrotechnics, informational technologies, control systems*. 2016;20:62-83. (In Russ.).
15. Tomov P., Aprahamyan B., Petrov K., Andreev P., Petkov P. Experimental survey and analysis on the impact of the commutation process on a positive displacement pump driven by an asynchronous electric motor. In: *16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems*. 2019. <http://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771523>.
16. Săvulescu, Siro B., Ianache C., Georgescu L. Simulation of the electric drive of a beam pumping unit and its comparative analysis for different operating frequencies. In: *6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*. 2019. <http://doi.org/10.1109/ISEEE48094.2019.9136112>.
17. Wang Po-Hao, Wen Tsrong-Yi. Effects of electrical driving mode on pressure and flow rate of wire-rod electrohydrodynamic pumps. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2020;10(4):621-625.

<http://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.2978305>.

18. Goppe G. G., Pavlov V. E. Dynamic process mathematical models for a technological complex "Electric Drive – Turbo-mechanism – Pipeline" when controlling its performance by changing electric drive rotation speed. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;1:121-125. (In Russ.).

19. Goppe G. G., Lukonin A. A., Pavlov V. E. Fuel – air ratio control in CHP plant boiler units at forced flow fan

performance regulation by throttling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;8:156-165. (In Russ.).

20. Goppe G. G., Pavlov V. E. Study of operation stability of the technological complex: electric motor – turbomechanism – pipeline. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012;5:150-158. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Павлов Владимир Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода
и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Критерии авторства

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.09.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022; принята к публикации 17.05.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir E. Pavlov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Electric Drive and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Authorship criteria

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

Conflict of interests

The author declares 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 article

The article was submitted 29.09.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for publication 17.05.2022.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 629.039.58

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-297-309>

Обоснование необходимости совершенствования систем противоаварийного управления для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению в энергосистемах

Иван Сергеевич Реуцкий^{1✉}, Виктор Григорьевич Курбацкий²^{1,2} Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия¹ivan.reutskii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0982-720X>²kurbatsky@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2457-241X>

Резюме. Цель – обоснование необходимости совершенствования существующих комплексов обеспечения устойчивости по напряжению в Единой энергетической системе России в условиях ее развития, усложнения структуры и активного внедрения распределенной генерации. В целях выявления необходимости совершенствования комплексов противоаварийной автоматики выполнялся анализ функционирования существующих систем противоаварийного управления Единой энергосистемы России в условиях протекания крупных системных аварий, в том числе в 2005 и 2017 гг., а также рассматривались особенности режимов северной части энергосистемы Иркутской области с точки зрения устойчивости по напряжению. В результате анализа работы систем противоаварийного управления по итогам системных аварий, а также возможных неправильных действий в рассмотренных ситуациях, установлено, что основными их недостатками являются низкий уровень отказоустойчивости, слабая адаптивность к аварийным возмущениям (в том числе ненормативным), а также отсутствие координации локальных устройств и большая дискретность регулирования. Для устранения данных недостатков предложено внедрение в структуру противоаварийного управления Единой энергосистемы России интеллектуальных автоматик на основе искусственных нейронных сетей и машинного обучения, а также высокоэффективных мультиагентных систем. Проведенные в работе исследования свидетельствуют о необходимости модернизации существующих комплексов обеспечения устойчивости по напряжению в Единой энергосистеме России, как программно, так и аппаратно-технически. Предлагаемое внедрение интеллектуальных систем способно устранить недостатки существующих комплексов, однако оно не должно нарушать текущие эффективные иерархические принципы противоаварийного управления, а обязано дополнять их, способствуя комплексному развитию.

Ключевые слова: устойчивость, напряжение, противоаварийная автоматика, системные аварии, энергосистема

Для цитирования: Реуцкий И. С., Курбацкий В. Г. Обоснование необходимости совершенствования систем противоаварийного управления для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению в энергосистемах // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 297–309. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-297-309>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Justification of the need to improve emergency control systems for preventing disturbances of voltage stability in power systems

Ivan S. Reutsky^{1✉}, Viktor G. Kurbatsky²^{1,2} Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia¹ivan.reutskii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0982-720X>²kurbatsky@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2457-241X>

Abstract. This article is aimed at justifying the need to modernize the existing systems that ensure voltage stability in the Unified Power System of Russia under the conditions of its permanent development, structural complication and active implementation of distributed generation. To this end, an analysis of the existing systems of emergency control used in the Unified Power System of Russia was conducted by considering their efficiency during major system accidents, including those in 2005 and 2017. In addition, specific features of operating power system facilities in the northern part of

the Irkutsk Oblast were investigated from the standpoint of voltage stability. The conducted analysis of the operation of emergency control systems in the context of system accidents, including possible incorrect actions, identified their following disadvantages: insufficient fault tolerance, weak adaptability to emergency disturbances (including abnormal situations), as well as a lack of coordination between local devices and the discreteness of regulation. These shortcomings can be eliminated by introducing intelligent automation systems based on artificial neural networks and machine learning, as well as high-performance multi-agent systems into the structure of the emergency management of the Unified Power System of Russia. The results obtained indicate the need to modernize the existing voltage stability systems operated in the Unified Power System of Russia, both their software and hardware components. The proposed implementation of intelligent systems is expected to improve the existing systems at the same time as maintaining the current effective hierarchical principles of emergency management.

Keywords: stability, voltage, automated emergency control equipment, system failures, power system

For citation: Reutsky I. S., Kurbatsky V. G. Justification of the need to improve emergency control systems for preventing disturbances of voltage stability in power systems. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):297-309. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-297-309>.

ВВЕДЕНИЕ

Системные аварии в электроэнергетических системах (ЭЭС) нередко возникают из-за нарушений устойчивости по напряжению, причиной которых является образование локальных дефицитов реактивной мощности в узлах нагрузки. Основными факторами, влияющими на устойчивость такого типа, являются непрогнозируемые внезапные изменения нагрузки потребителей и аварийные возмущения. Дефицит пропускной способности связей ЭЭС с удаленными узлами нагрузки и отсутствие источников реактивной мощности (ИРМ) в них могут привести к лавине напряжения. Помимо достаточности резервов реактивной мощности в системе, при возникновении аварии требуется их координация для корректного распределения по узлам нагрузки за наименьшее время. При используемом в Единой энергетической системе (ЕЭС) России подходе встречного регулирования напряжения в ЭЭС сделать это достаточно проблематично, т.к. традиционные методы обеспечения устойчивости по напряжению могут оказаться несвоевременными или неэффективными, что в некоторых случаях может способствовать развитию аварии [1–8].

Ограничения по напряжению преобладают в концентрированных энергосистемах, которые характеризуются сильными связями с большим потреблением мощности. К ним можно отнести крупные системы промышленных центров и крупных городов, а также большинство европейских и североамериканских ЭЭС. Снижение напряжения является ключевым фактором, ограничивающим их устойчивость. Однако по мере развития эко-

номики России будет развиваться инфраструктура, в том числе промышленные центры, которые сформируют отдельные энергорайоны ЕЭС России со структурой, подобной западной. Стоит отметить, что в последнее время в ЕЭС России доля распределенной генерации (РГ) увеличивается. В основном это вызвано ростом стоимости электроэнергии для промышленных потребителей, а также современными тенденциями перехода на возобновляемые источники энергии и декарбонизацией. В ЕЭС России уже разработана концепция внедрения РГ в структуру ЕЭС, которая находится на стадии пилотных проектов и будет обеспечивать ее интеграцию в ближайшем будущем, что в свою очередь, приведет к изменению структуры ЕЭС, в которой возможны ограничения по устойчивости напряжения [9–15] аналогично западным ЭЭС.

СИСТЕМНЫЕ АВАРИИ, СВЯЗАННЫЕ С НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Сценарии протекания множества крупных системных аварий, в т.ч. связанных с неустойчивостью по напряжению, как правило, имеют определенные закономерности. Можно подчеркнуть, что возникновение аварий начинается с крупного возмущения, в большинстве случаев ненормативного [1, 2]. Под «нормативным возмущением» в ЭЭС понимается аварийное возмущение, учет которого необходим при проведении расчетов устойчивости энергосистемы³, соответственно, ненормативными являются все остальные. Для каждой схемы электрической сети, нормальной или ремонтной, а также для электроэнер-

гетического режима, нормального, послеаварийного или вынужденного, порядок учета нормативных возмущений четко определен⁴. Термина «ненормативное возмущение» в нормативной документации не существует, поэтому в дальнейшем под ним будем понимать одно нерасчетное или наложение большого количества расчетных (нормативных) аварийных возмущений за малый промежуток времени (менее 20 мин). Стоит отметить, что степень их тяжести намного больше, чем нормативных, что подтверждается практикой. Вероятность таких возмущений мала, поэтому их учет при планировании режима производится достаточно редко, чаще всего при наличии оснований их возникновения (переключения с большим риском отказов элемента, изношенность оборудования), и сопровождается подготовкой резервов заблаговременно, что, в свою очередь, затрагивает финансовый аспект обеспечения надежности в ЭЭС. В большинстве случаев учет таких возмущений на постоянной основе экономически нецелесообразен.

Параметры электроэнергетического ре-

жима (частота электрического тока, перетоки активной мощности по линии электропередачи (ЛЭП) и в контролируемых сечениях, токовая нагрузка ЛЭП и электросетевого оборудования, напряжение на шинах 110 кВ и выше) после возмущения могут по-прежнему оставаться допустимыми для текущего (послеаварийного) режима, но часть из них уже может находиться на границе устойчивости. Следующее нормативное возмущение в данном случае может вызвать одновременное нарушение уже нескольких параметров режима, что приведет к значительному ухудшению работы ЭЭС и, как следствие, к возможному каскадному развитию аварии [1–8].

В результате анализа развития системных аварий в [5] выделяют характерные периоды их протекания (рис. 1): предаварийное состояние, иницирующие события, каскадное развитие аварии, послеаварийное (конечное) состояние и восстановление. Каскадное развитие аварии, в свою очередь, можно разделить на следующие фазы: медленного развития аварии, запускающих (триггерных) событий и быстрого развития.

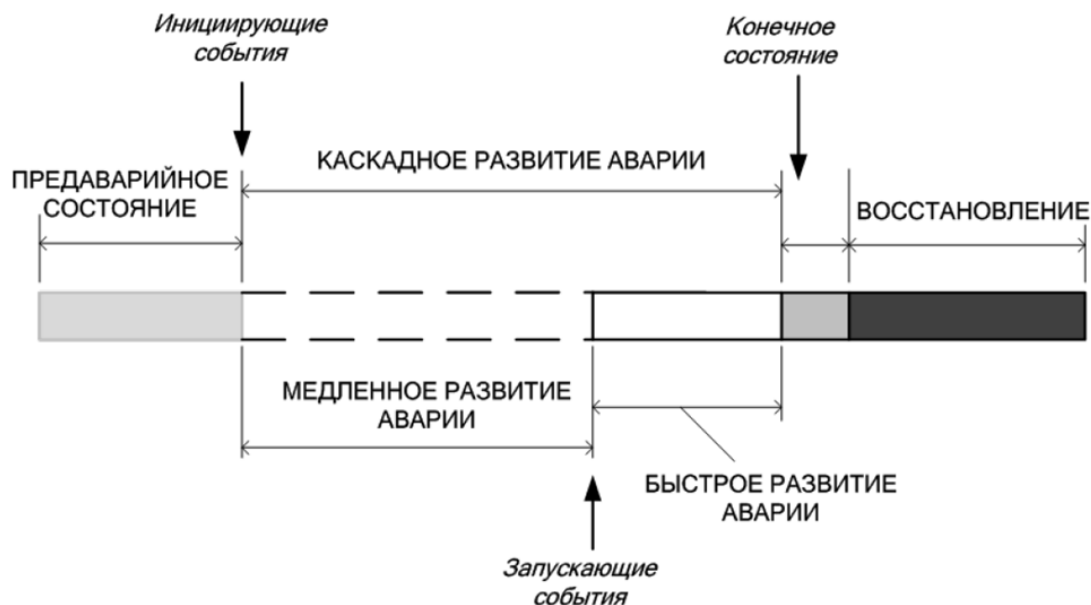


Рис. 1. Характерные периоды развития системной аварии [5]
Fig. 1. Characteristic development phases of a system failure [5]

³ Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации. Утв. приказом Минэнерго России № 937 от 13.08.2018, изм. от 30.01.2021. М., 2021.

⁴ Методические указания по устойчивости энергосистем. Утв. приказом Минэнерго России № 630 от 03.08.2018, изм. от 28.12.2020. М., 2020.

Как правило, после первого возмущения в ЭЭС и возникновения медленной фазы развития аварии система сохраняет свою целостность. Анализ аварий показывает, что время предаварийного состояния и медленного развития аварии может варьироваться от нескольких минут до нескольких часов, что дает возможность диспетчерскому персоналу принять эффективные меры по ликвидации нарушений.

Даже при медленном развитии аварии необходимое для реализации мероприятий по ликвидации аварии время в ряде случаев бывает ниже возможностей диспетчерского и оперативного персонала. В результате их действия являются недостаточно эффективными, что, в свою очередь, может привести к каскадному развитию аварии, как это было в Московской ЭЭС в 2005 г.

В качестве основных причин можно выделить многочисленные: в течение короткого промежутка времени (медленное развитие аварии) отключение ЛЭП 220 кВ из-за неудовлетворительных условий эксплуатации ЛЭП (уязвимость), что являлось ненормативным возмущением (инициирующее событие) и привело к перегрузке шунтирующих ЛЭП 110 кВ и их последующему каскадному отключению и, как следствие, к лавинообразному снижению напряжения на шинах энергообъектов ниже критического уровня, определяющего режим работы генерирующего оборудования электростанций и потребителей. В результате этого произошел частичный или полный сброс нагрузки электростанций, в том числе с потерей собственных нужд, и отключение потребителей центральной части Объединенной энергетической системы (ОЭС) Центра в объеме около 3500 МВт (быстрое развитие аварии). Из-за многочисленных устойчивых повреждений ЛЭП меры, принятые оперативным персоналом по восстановлению нормальной схемы электрической сети, были недостаточно эффективными. Скорость развития аварии намного превышала возможности оперативного и диспетчерского персонала по обработке больших объемов информации и принятию правильных мер по ликвидации нарушений нормального режима. Следует также отметить, что на тот момент в Московской ЭЭС отсутствовала автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН), наличие которой, воз-

можно, улучшило бы ситуацию, но при возмущениях подобного рода эффективность данной автоматики достаточно низкая [3, 5].

Также возникают аварии, в которых вовсе отсутствует фаза медленного развития аварии, и инициирующее событие запускает быструю фазу, что в случае аварии в ОЭС Сибири в 2017 г. привело к погашению потребителей части ЭЭС спустя несколько секунд. В результате ложной работы противоаварийной автоматики (ПА) на Братской гидроэлектростанции (ГЭС) была сформирована команда на отключение нагрузки (инициирующее событие – ненормативное возмущение) в Иркутской области в объеме 825 МВт. В условиях ремонтной схемы сети 500 кВ неправильным действием локальной автоматики предотвращения нарушения устойчивости (ЛАПНУ) подстанции (ПС) 500 кВ Озерная вместо отключения генераторов (балансирующее воздействие) была дополнительно отключена нагрузка алюминиевого завода в объеме 647 МВт (следующее возмущение – запускающее событие). Здесь стоит отметить, что помимо первого ненормативного возмущения дополнительно случилось второе, тоже ненормативное, произошло их наложение, что и запустило каскадное развитие аварии. Дополнительное отключение нагрузки потребителей в одной части привело к набросу мощности в контролируемых сечениях другой части ОЭС Сибири и снижению напряжения, вследствие чего действием автоматической ликвидации асинхронного режима отключились системные ВЛ 500 кВ, и в результате восточная часть ОЭС Сибири в составе Иркутской, Бурятской, Забайкальской энергосистем и части энергосистемы Красноярского края выделилась на изолированную работу от ЕЭС России (быстрое развитие аварии). По факту отключения ВЛ 500 кВ действием ЛАПНУ были реализованы управляющие воздействия (УВ) на отключение генерирующего оборудования в объеме 2173 МВт и отключение нагрузки алюминиевых заводов в ОЭС Сибири в объеме 1054 МВт. В выделившейся восточной части ОЭС Сибири действием защит и автоматики ограничения повышения частоты отключилось генерирующее оборудование на ТЭС и ГЭС операционной зоны. При этом на Богучанской ГЭС действием защит от перегрузки отключились все находившиеся в работе гидрогенераторы

со снижением нагрузки станции до нуля (еще одно ненормативное возмущение), что вызвало дополнительный дефицит мощности. Суммарно станции в выделившейся восточной части ОЭС Сибири снизили нагрузку на величину 6677 МВт. В результате возникшего дефицита мощности в выделенной части ОЭС Сибири и последующего снижения частоты до 47,7 Гц сработала автоматическая частотная разгрузка в объеме 1759 МВт. В общей сложности были обесточены потребители мощностью 4385 МВт [8].

Минэнерго Российской Федерации по результатам анализа вышеописанной, а также подобных системных аварий, констатировало наличие в энергосистемах большого разнообразия микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, для измерительных органов значительной части которых характерен недопустимый рост погрешности измерений при отклонении частоты от номинальной. Это приводит к отказам в срабатывании устройств или к их излишней работе, что вызывает каскадное развитие аварий [8].

Результатом данной аварии также стало усиление требований к анализу устойчивости по напряжению в ЭЭС и выявлению дополнительных узлов сети для контроля уровней напряжения и обеспечению резервами реактивной мощности крупных узлов нагрузки. Таким образом, для каждого узла, предел передачи мощности в который ограничивается статической устойчивостью, должен быть назначен контрольный пункт по напряжению с указанием требуемых минимальных границ графика напряжения, а также обеспечена требуемая располагаемая реактивная мощность в узле, при которой возможно обеспечение допустимых уровней напряжения в узлах в послеаварийных режимах⁵.

Аварии, сопровождающиеся наличием только быстрой фазы развития аварии в качестве инициирующего события, как правило, имеют ненормативное возмущение, учет ко-

торых при планировании электроэнергетического режима, как отмечалось ранее, не производится. В таких случаях аварийный режим ликвидируется действием ПА, которая, как показал данный пример, не всегда может корректно реагировать на возмущения в ЭЭС, а восстановлением послеаварийной схемы занимается диспетчер (этап восстановления).

Исходя из типов возмущений в произошедших системных авариях (таблица) можно сделать вывод, что лавина напряжения в ЭЭС – не единичный случай и происходит достаточно часто. В данной выборке присутствует и авария 2005 г. в Московской энергосистеме, связанная с нарушением устойчивости по напряжению. Данная авария нетипична в целом для ЕЭС России, характеризующейся длинными протяженными связями и наличием в основном ограничений по устойчивости параллельной работы генераторов. Протекание данной аварии наиболее уместно для ЭЭС Европы и Северной Америки, концентрированных систем, где снижение напряжения является ключевым фактором, ограничивающим устойчивость системы. Поэтому можно предположить, что в будущем в ЕЭС России при развитии мегаполисов и крупных промышленных центров могут возникать подобные аварии, связанные с лавиной напряжения.

Послеаварийное (конечное) состояние системы обычно характеризуется сниженным запасом устойчивости относительно нормального, в том числе по напряжению, большим количеством отключенных элементов сети, потребителей и/или генерирующего оборудования. Этап восстановления производится под руководством диспетчерского персонала путем включения отключившегося оборудования, ввода оборудования, находившегося в ремонте, включения потребителей и создания наиболее надежной послеаварийной схемы⁶.

⁵ СТО 59012820.27.010.002-2014. Стандарт организации. Правила разработки графика напряжения в контрольных пунктах диспетчерского центра ОАО «СО ЕЭС». М., 2014.

⁶ Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики» № 548. от 12.07.2018. М., 2018.

Возникновение различных типов нарушений при каскадных авариях [5]
Occurrence of various types of emergencies under cascading failures [5]

Системная авария: дата, страна	Тип аварийного возмущения			
	лавина напряжения	лавина частоты	перегрузка элементов	потеря синхронизма
09.11.65, США	–	–	+	–
31.05.75, СССР, Казахстан	–	+	–	+
13.07.77, Нью-Йорк, США	–	+	–	–
19.12.78, Франция	+	–	+	–
02.07.96, США	+	–	+	–
07.08.96, США	+	–	+	–
14.08.03, США, Канада	+	–	+	–
23.09.03, Дания, Швеция	+	–	+	–
28.09.03, Италия	–	+	+	+
12.07.04, Афины, Греция	+	–	–	–
14.03.05, Австралия	–	–	–	+
25.05.05, Москва, Россия	+	–	+	–
31.07.12, Индия	+	–	+	–
27.06.17, ОЭС Сибири, Россия	–	–	+	+

Примечание: ОЭС – Объединенная энергетическая система.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ИХ НЕДОСТАТКИ

Основной задачей систем противоаварийного управления в ЭЭС является сохранение устойчивости энергосистем для предотвращения развития аварий [9]. Комплексы противоаварийной автоматики (ПА) предназначены для того, чтобы остановить нарушение устойчивости на ранней стадии развития и способствовать быстрому восстановлению нормального режима энергосистемы после аварийной ситуации, на которой было остановлено развитие аварии [10]. Можно отметить, что из-за большой протяженности территорий Российской Федерации, а также удаленности потребителей электроэнергии от источников генерации, характерным ограничением большинства связей ЕЭС России является устойчивость параллельной работы энергосистем или отдельных ее частей. Основным средством сохранения устойчивости параллельной работы является автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), при этом средством сохранения устойчивости по напряжению служит локальная автоматика АОСН.

С точки зрения сохранения устойчивости по напряжению рассмотрим функционирование автоматики АОСН. В послеаварийных

режимах напряжение в контрольных пунктах энергосистем может снижаться до недопустимых значений по условиям устойчивости параллельной работы энергосистем и отдельных ее частей и нагрузки потребителей. АОСН не допускает этого, используя пусковым фактором неприемлемое по величине и длительности снижение напряжения (при снижении напряжения, как правило, 0,85 Uном) на шинах определенных узлов, выдавая УВ на изменение режима работы или эксплуатационного состояния средства компенсации реактивной мощности (СКРМ), изменение топологии электрической сети или отключение нагрузки, изменяя этим баланс реактивной мощности в узле [9]. В качестве ПО АОСН использует два реле напряжения с близким к единице коэффициентом возврата, присоединенным по цепям напряжения на разные трансформаторы напряжения и реле времени. Выдержки времени АОСН обычно составляют от 5 до 15 с, при этом выдержка времени первой ступени должна обеспечить отстройку от действия сетевых автоматов – автоматическое повторное включение и автоматический ввод резерва.

Реализация такой автоматики достаточно проста, что можно отнести к ее достоинствам. Однако при возникновении аварийных ситуаций, помимо наличия резервов реактивной мощности, в ЭЭС необходима их координация для корректного распределения

реактивной мощности по узлам нагрузки за наименьшее время. При существующем методе встречного регулирования напряжения в ЭЭС и действия АОСН в аварийных ситуациях обеспечить это практически невозможно, что является существенным недостатком. Также к недостаткам такой автоматики можно отнести большие выдержки времени, дискретность регулирования, последствия которых могут привести к избыточным УВ и, как следствие, к повышению напряжения выше наибольших рабочих значений в послеаварийных режимах.

Стоит отметить, что в существующих ЭЭС на текущий момент отсутствуют полноценные системы противоаварийного управления (ПАУ) предотвращения нарушения устойчивости по напряжению, так как скорость протекания лавины напряжения намного быстрее, чем реализация УВ от ПА. Основные недостатки АОСН, как отмечалось ранее, – это низкая скорость реализации УВ и высокая дискретность управления СКРМ. Принципы существующей АПНУ (как средства предотвращения нарушения устойчивости по напряжению) не позволяют выполнять соответствующе ПАУ в нерасчетных режимах и при ненормативных возмущениях, которые возникают при системных авариях [10].

В отношении координации устройств ПА анализ, проведенный в [12], показал, что в ЕЭС и западных ЭЭС совершенствование систем ПАУ имеет тенденцию к большей централизации функций этих систем без достаточной иерархической декомпозиции задач. Такое усиление, в первую очередь, необходимо для обеспечения устойчивости параллельной работы энергосистем, однако главным недостатком централизации является снижение отказоустойчивости комплексов ПА ввиду повышения сложности структуры составляющих систем, а также их большая стоимость из-за высокой требуемой вычислительной мощности для перебора в головном устройстве большого сочетания числа схем и аварийных возмущений. Поэтому излишняя централизация не должна препятствовать возможности применения децентрализованных систем управления и повы-

шения интеллектуального уровня устройств ПАУ, способствуя их адаптивности в условиях нерасчетных режимов.

Задача обеспечения устойчивости по напряжению требует эффективного управления напряжением в ЭЭС путем изменения состояния СКРМ еще до возникновения аварии или быстрого управления при ее возникновении [16–20]. При этом существующие принципы ПАУ, применяемые в ЕЭС России, обладают большой дискретностью и не обеспечивают требуемого быстродействия (ввиду необходимости отстройки от коротких замыканий) либо приводят к избыточности действий с повышением напряжения в послеаварийном режиме выше наибольших рабочих значений.

Подобные аварийные ситуации со снижением напряжения возникали в схеме Бодайбинского энергорайона (рис. 2) северной части энергосистемы Иркутской области до усиления схемы путем масштабного электросетевого строительства в конце 2019 г. Энергорайон получал электроснабжение в тупиковом режиме по двухцепному транзиту 220 кВ Байкало-Амурской магистрали (БАМ) от Усть-Илимской ГЭС и являлся дефицитным: единственными источниками активной и реактивной мощности были генераторы Мамаканской ГЭС, дефицит мощности покрывался из внешней сети, при этом СКРМ, как и АОСН, в энергорайоне на тот момент отсутствовали. Возникновение аварийных возмущений, таких как отключение генератора или транзитных линий электропередачи (ЛЭП), приводило к значительному снижению напряжения в узлах нагрузки, что могло вызвать срыв технологического процесса и отключения оборудования потребителей [13, 14, 17].

В конце 2019 г. после строительства Бодайбинского энергетического кольца (БЭК, рис. 3) северной части энергосистемы Иркутской области проблема управления напряжением сохранилась. От БЭК, которое образуют узловые подстанции Усть-Кут, Пеледуй и Мамакан, связанные протяженным двухцепным транзитом ВЛ 220 кВ, осуществляется электроснабжение потребителей электрической энергии в районах Иркутской области,

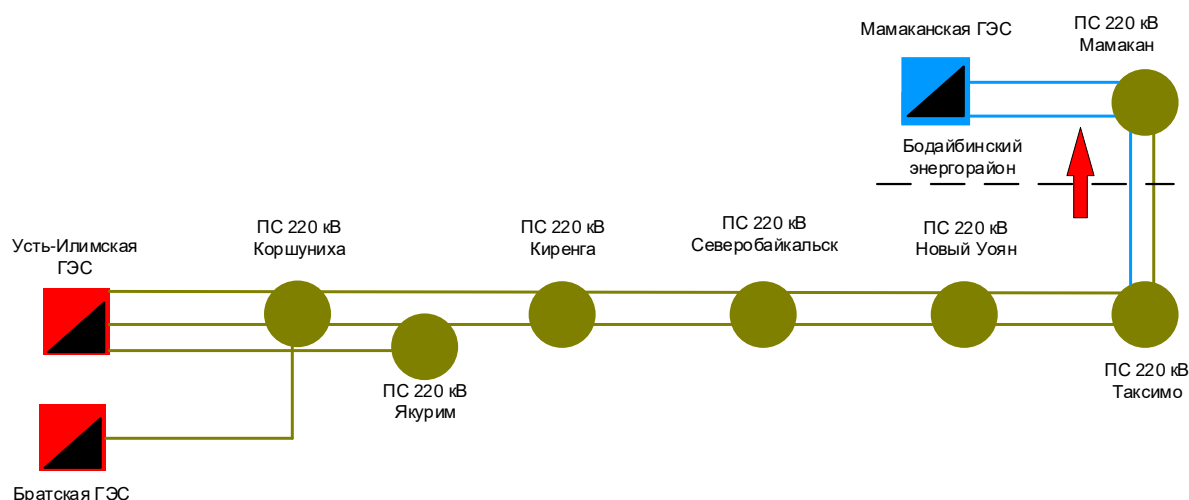


Рис. 2. Схема питания Бодайбинского энергорайона до 2019 г.
Fig. 2. Power supply circuit of the Bodaibo energy district until 2019

Республик Бурятия и Саха (Якутия). Центрами питания БЭК являются подстанции Усть-Кут и Мамаканская ГЭС. Теперь для целей управления напряжением на транзите установлено достаточное количество СКРМ, однако отсутствует их автоматическая координация, что усложняет процесс регулирования. Управление напряжением в БЭК путем выдачи диспетчерских команд оперативному персоналу энергообъектов в нормальном режиме является эффективным при медленных изменениях режима. В аварийных режимах в работу вступает АОСН, но она не всегда является эффективной, т.к. не обладает достаточной гибкостью и адаптивностью выдачи управляющих воздействий, что в ряде случаев может приводить к их избыточности или недостаточности, и, как следствие, к выходу за границы допустимых значений. На текущий момент, в случае аварийных возмущений, связанных с разрывом энергокольца с глубоким снижением напряжения (в утяжеленных режимах), проблема неустойчивости по напряжению актуальна для энергорайона, принимая во внимание ограничение доставки реактивной мощности к дефицитным узлам нагрузки по протяженным электрическим ЛЭП⁷.

В рис. 3 обозначения: ВСТО – Восточная Сибирь – Тихий океан; НПС – нефтеперекачивающая станция.

Изучение структуры функционирования ПАУ ЕЭС России, анализ аварий, а также вышеупомянутые примеры позволяют выделить ее недостатки с точки зрения сохранения устойчивости по напряжению. В качестве основных следует отметить низкий уровень отказоустойчивости систем ПАУ, слабую адаптивность при ненормативных возмущениях и нерасчетных режимах, а также отсутствие координации локальных устройств ПА и большую дискретность регулирования, что также является низким показателем режимной надежности и отсутствием гибкости ЭЭС. Локальные РЗ и ПА в ряде случаев (отказ, ложная работа) могут сами являться причиной каскадного развития аварий из-за низкой степени их адаптивности. При этом передача функций координации локальных устройств ПА централизованным комплексам не всегда может быть эффективным решением. Поэтому в целях сохранения устойчивости по напряжению необходима разработка интеллектуальных средств ПАУ, которые должны координировать локальные устройства с учетом устранения вышеупомянутых недостат-

⁷ Северобайкальское кольцо – всех проблем одно решение // Корпоративный журнал АО «СО ЕЭС». 2020. № 2. С. 34–40. [Электронный ресурс]. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/newspaper/2020_02_50h_v.pdf (14.09.2021).

ков. Необходимо отметить, что возможная децентрализация не должна нарушать существующие эффективные иерархические принципы противоаварийного управления в ЕЭС России, а дополнять их, способствуя комплексному развитию и повышая этим надежность системы ПАУ в целом.

Модели и системы на основе искусственного интеллекта (ИИ) предполагают дополнение существующих средств ПАУ, повышая, таким образом, их интеллектуальный уровень. Последние разработки связаны с применением методологии распределенного ИИ, а также мультиагентных систем (МАС), показавших свою эффективность [18]. МАС, как правило, используют технологию децентрализованного или частично-децентрализованного (гибридного) управления ЭЭС [21, 22]. Другим перспективным подходом является использование моделей машинного обучения (МО), обученных осуществлять автоматическое регулирование СКРМ на основе своевременного распознавания характерных индикаторов устойчивости ЭЭС, таких как L-индекс [23]. На практике, для предотвращения нарушений устойчивости по напряжению, при аварийных возмущениях в

Бодайбинском энергорайоне (см. рис. 2 в [13]) авторами статьи была применена гибридная система регулирования напряжения на основе МО и МАС, которая показала свою эффективность. На текущий момент данная система тестируется на более сложной схеме БЭК (см. рис. 3). Стоит отметить, что указанная система регулирования напряжения, эффективность которой ранее оценивалась только на тестовых схемах IEEE, впервые была использована на схеме реальных энергообъединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время по мере развития и концентрирования энергосистем и роста электропотребления, а также активного внедрения в структуру ЕЭС России объектов малой генерации, все большее значение приобретают задачи сохранения устойчивости по напряжению при возникновении в ЭЭС случайных возмущений. Следовательно, для выполнения данной задачи требуется эффективная система ПАУ, которая будет выполнять такие функции. Ключевыми характеристиками таких ПА, как отмечалось ранее,

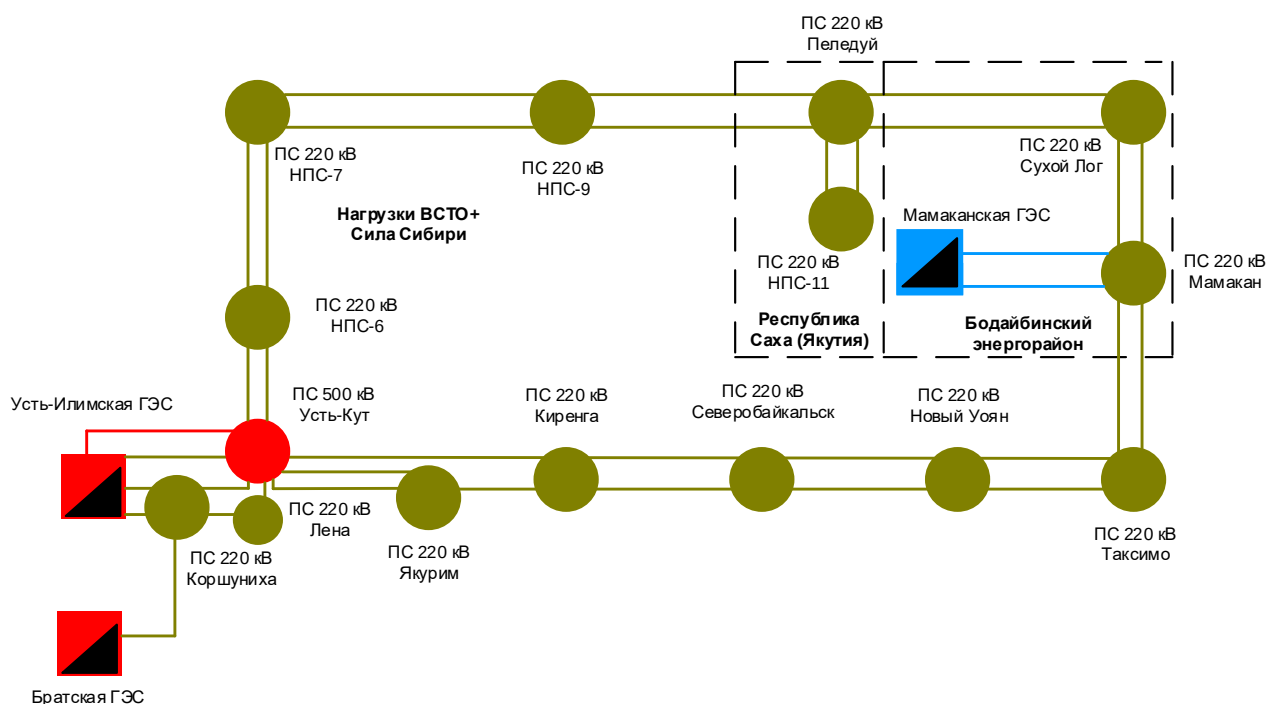


Рис. 3. Схема Бодайбинского энергокольца
Fig. 3. Diagram of the Bodaibo energy circle

должны быть децентрализация, гибкость и адаптивность к внешним условиям ЭЭС. Существующие системы ПА, применяемые в ЭЭС России, в ряде случаев могут быть недостаточно эффективны в реализации УВ и иметь определенные недостатки, такие как низкий уровень отказоустойчивости, слабая адаптивность, отсутствие координации и дискретность регулирования. Поэтому необходимо совершенствование существующих систем ПАУ для обеспечения устойчивости по напряжению, для координации локальных устройств автоматики и повышения уровня их отказоустойчивости, адаптивности и гиб-

кости. Так как на данный момент в структуре ПАУ ЭЭС России активно применяются принципы централизованного и локального управления, то при разработке автоматики предотвращения неустойчивости по напряжению необходимо предложить как новые алгоритмы, так и возможность внедрения данной автоматики в существующую структуру ПАУ ЭЭС России. Эффективным способом может стать дополнение существующей системы ПАУ интеллектуальными средствами, в том числе на основе МО и МАС, которые уже показали свою эффективность.

Список источников

1. Müller S. C., Kubis A., Brato S., Häger U., Rehtanz C., Götze J. New applications for wide-area monitoring, protection and control // 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe. 2012. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465657>.
2. Lachs W. R. Controlling grid integrity after power system emergencies // IEEE Transactions on Power Systems. 2002. Vol. 17. No. 2. P. 445–450. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.1007916>.
3. Герасимов А. С., Есипович А. Х., Кошечев Л. А., Шульгинов Н. Г. Исследование режимов Московской энергосистемы в процессе развития аварии в мае 2005 г. // Электричество. 2008. № 1. С. 2–12.
4. Makarov Y. V., Reshetov V. I., Stroev A., Voropai N. I. Blackout prevention in the United States, Europe, and Russia // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. Iss. 11. P. 1942–1955. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.857486>.
5. Воропай Н. И., Курбацкий В. Г., Томин Н. В., Панасецкий Д. А., Сидоров Д. Н., Жуков А. В. [и др.]. Комплекс интеллектуальных средств для предотвращения крупных аварий в энергосистемах: монография. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2016. 332 с.
6. Allen E., Andersson G., Berizzi A., Boroczky S. Blackout experiences and lessons, best practices for system dynamic performance, and the role of new technologies. Final Report. IEEE, 2007. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/272482692> (14.09.2021).
7. Voropai N., Tomin N., Kurbatsky V., Panasetsky D., Sidorov D., Zhukov A. Development of computational intelligence-based algorithms of preventing voltage collapse in power systems with a complex multi-loop structure // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2016. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7827553>.
8. Воропай Н. И., Ефимов Д. Н., Маяков Д. В., Клепиков С. А., Смирнов С. С. Авария в объединенной энергосистеме Сибири 27 июня 2017 г. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. тр. XX Междунар. науч. семинара (г. Иркутск, 6 августа 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2018. Р. 208–218.
9. Совалов С. А., Семенов В. А. Противоаварийное управление в энергосистемах. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1988. 416 с.
10. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Изд-во «Энергия», 1979. 456 с.
11. Панасецкий Д. А., Томин Н. В., Курбацкий В. Г., Воропай Н. И., Ефимов Д. Н. Интеллектуальное противоаварийное управление режимами энергосистем // XII Всерос. совещание по проблемам управления: сб. тр. (г. Москва, 16–19 июня 2014 г.). М.: Изд-во ИПУ РАН, 2014. С. 4770–4782.
12. Воропай Н. И., Негневицкий М., Томин Н. В., Панасецкий Д. А., Курбацкий В. Г., Ретанц К. [и др.]. Интеллектуальная система для предотвращения крупных аварий в энергосистемах // Электричество. 2014. № 8. С. 19–31.
13. Реуцкий И. С., Курбацкий В. Г., Томин Н. В. Предотвращение неустойчивости по напряжению с использованием моделей искусственного интеллекта // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. тр. XX Междунар. науч. семинара (г. Иркутск, 6 августа 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2018. Р. 364–173.
14. Курбацкий В. Г., Реуцкий И. С., Томин Н. В. Исследование режимной надежности «узких» мест энергосистемы Иркутской области на примере Бодайбинского энергорайона // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. тр. XX Междунар. науч. семинара (г. Чолпон-Ата, 11–15 сентября 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2017. Вып. 68. Р. 413–420.
15. Реуцкий И. С. Исследование проблемы организации оперативно-диспетчерского управления при взаимодействии филиалов АО «СО ЭЭС» – РДУ и ЭССО // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. науч. тр. X Междунар. науч. конф. (г. Иркутск, 20 сентября 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. Р. 231–234.

16. Baldick B., Chowdhury B., Dobson I., Dong Zhaoyang, Gou Bei, Hawkins D., et al. Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems IEEE PES CAMS task force on understanding, prediction, mitigation and restoration of cascading failures // IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596430>.
17. Tomin N. V., Kurbatsky V. G., Reutsky I. S. Hybrid intelligent technique for voltage/VAR control in power systems // The Institution of Engineering and Technology. 2019. Vol. 13. Iss. 20. P. 4724–4732. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0214>.
18. Zhukov A., Tomin N., Sidorov D., Kurbatsky V., Panasetsky D. On-line power systems security assessment using data stream random forest algorithm modification // Innovative Computing, Optimization and Its Applications / eds. I. Zelinka, P. Vasant, V. Duy, T. Dao. Cham: Springer, 2018. Vol. 741. P. 183–200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66984-7_11.
19. Su Heng-Yi, Liu Tzu-Yi. Enhanced-online-random-forest model for static voltage stability assessment using wide area measurements // IEEE Transactions on Power

- Systems. 2018. Vol. 33. Iss. 6. P. 6696–6704. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2849717>.
20. Li Xuan, Li Zhaowei, Guan Linlin, Zhu Ling, Liu Fusuo. Review on transient voltage stability of power system // IEEE Sustainable Power and Energy Conference. 2020. P. 940–947. <https://doi.org/10.1109/ISPEC50848.2020.9351059>.
21. Aquino-Lugo A. A., Klump R., Overbye T. J. A control framework for the smart grid for voltage support using agent-based technologies // IEEE Transactions on Smart Grid. 2011. Vol. 2. Iss. 1. P. 173–180. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2096238>.
22. Belkacemi R., Babalola A., Zarrabian S. Experimental implementation of multi-agent system algorithm to prevent cascading failure after N-1-1 contingency in smart grid systems // IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2015. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286630>.
23. Xu Yinliang, Zhang Wei, Liu Wenxin, Ferrese F. Multi-agent-based reinforcement learning for optimal reactive power dispatch // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). 2012. Vol. 42. Iss. 6. P. 1742–1751. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2012.2218596>.

References

1. Müller S. C., Kubis A., Brato S., Häger U., Rehtanz C., Götze J. New applications for wide-area monitoring, protection and control. In: *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*. 2012. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465657>.
2. Lachs W. R. Controlling grid integrity after power system emergencies. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. 2002;17(2):445-450. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.1007916>.
3. Gerasimov A. S., Esipovich A. H., Koshcheev L. A., Shul'ginov N. G. Research of the states of the Moscow power system in the process of the accident in May 2005. *Elektrichestvo*. 2008;1:2-12. (In Russ.).
4. Makarov Y. V., Reshetov V. I., Stroeve A., Voropai N. I. Blackout prevention in the United States, Europe, and Russia. *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(11):1942-1955. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.857486>.
5. Voropaj N. I., Kurbackij V. G., Tomin N. V., Panaseckij D. A., Sidorov D. N., Zhukov A. V., et al. A set of intelligent tools to prevent major accidents in power systems. Novosibirsk: Nauka; 2016, 332 p. (In Russ.).
6. Allen E., Andersson G., Berizzi A., Boroczky S. Black-out experiences and lessons, best practices for system dynamic performance, and the role of new technologies. Final report. IEEE; 2007. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/272482692> [Accessed 14th September 2021].
7. Voropai N., Tomin N., Kurbatsky V., Panasetsky D., Sidorov D., Zhukov A. Development of computational intelligence-based algorithms of preventing voltage collapse in power systems with a complex multi-loop structure. In: *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7827553>.

8. Voropai N. I., Efimov D. N., Mayakov D. V., Klepikov S. A., Smirnov S. S. Accident in the energy power system of Siberia on June 27, 2017. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: sbornik nauchnyh trudov XX Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara = Methodological issues of studying the reliability of large energy systems: Collected scientific works of the 20th International scientific seminar*. 6 August 2018, Irkutsk. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018, p. 208-218. (In Russ.).
9. Sovalov S. A., Semenov V. A. *Emergency control in power systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1988, 416 p. (In Russ.).
10. Zhdanov P. S. *Issues of stability of electrical systems*. Moscow: Energiya; 1979, 456 p. (In Russ.).
11. Panaseckij D. A., Tomin N. V., Kurbackij V. G., Voropaj N. I., Efimov D. N. *Intelligent emergency control of power system modes*. In: *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya: sbornik trudov = All-Russian meeting on control problems: collected works*. 16–19 June 2014, Moscow. Moscow: V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2014, p. 4770-4782. (In Russ.).
12. Voropai N. I., Negnevickij M., Tomin N. V., Panaseckij D. A., Kurbackij V. G., Retantz K., et al. An intelligent system to prevent major accidents in power systems. *Elektrichestvo*. 2014;8:19-31. (In Russ.).
13. Reuckij I. S., Kurbackij V. G., Tomin N. V. Prevention of voltage instability using artificial intelligence models. In: *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: sbornik nauchnyh trudov XX Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara = Methodological issues*

of large energy system reliability research: Collected scientific works of the 20th International scientific seminar (6 August 2018, Irkutsk. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018, p. 364-173. (In Russ.).

14. Kurbackij V. G., Reuckij I. S. Tomin N. V. Investigation of mode reliability of Irkutsk region energy system bottlenecks on example of the Bodaibo energy district. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: sbornik nauchnyh trudov XX Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar = Methodological issues of researching large energy system reliability: Collected scientific works of the 20th International scientific seminar*. 11–15 September 2017, Cholpon-Ata. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, iss. 68, p. 413-420. (In Russ.).

15. Reutskij I. S. Study of the organization problem of the operational dispatch control under the interaction of branches of the System Operator of the Unified Energy System JSC (JSC SO UES) – Regional Dispatch Office of the Energy System of the Irkutsk Region and Energy Saving Heating Systems. *Elektroenergetika glazami molodezhi: sbornik nauchnyh trudov X Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii = Electric power industry through the eyes of youth: Collected scientific works of the 10th International scientific conference* 20 September 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, p. 231-234. (In Russ.).

16. Baldick B., Chowdhury B., Dobson I., Dong Zhaoyang, Gou Bei, Hawkins D., et al. Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems IEEE PES CAMS task force on understanding, prediction, mitigation and restoration of cascading failures. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. 2008. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596430>.

17. Tomin N. V., Kurbatsky V. G., Reutsky I. S. Hybrid

intelligent technique for voltage/VAR control in power systems. *The Institution of Engineering and Technology*.

2019;13(20):4724-4732. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0214>.

18. Zhukov A., Tomin N., Sidorov D., Kurbatsky V., Panasetsky D. On-line power systems security assessment using data stream random forest algorithm modification. In: Zelinka I., Vasant P., Duy V., Dao T. (eds.). *Innovative Computing, Optimization and its Applications. Studies in Computational Intelligence*. Cham: Springer; 2018, vol. 741, p. 183-200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66984-7_11.

19. Su Heng-Yi, Liu Tzu-Yi. Enhanced-online-random-forest model for static voltage stability assessment using wide area measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;33(6):6696-6704. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2849717>.

20. Li Xuan, Li Zhaowei, Guan Linlin, Zhu Ling, Liu Fusuo. Review on transient voltage stability of power system. In: *IEEE Sustainable Power and Energy Conference*. 2020;940-947.

<https://doi.org/10.1109/iSPEC50848.2020.9351059>.

21. Aquino-Lugo A. A., Klump R., Overbye T. J. A control framework for the smart grid for voltage support using agent-based technologies. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011;2(1):173-180. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2096238>.

22. Belkacemi R., Babalola A., Zarrabian S. Experimental implementation of multi-agent system algorithm to prevent cascading failure after N-1-1 contingency in smart grid systems. In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2015. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286630>.

23. Xu Yinliang, Zhang Wei, Liu Wenxin, Ferrese F. Multi-agent-based reinforcement learning for optimal reactive power dispatch. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2012;42(6):1742-1751.

<https://doi.org/10.1109/TSMCC.2012.2218596>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Реуцкий Иван Сергеевич,

аспирант,

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Курбацкий Виктор Григорьевич,

доктор технических наук, профессор,

главный научный сотрудник Отдела

электроэнергетических систем № 40,

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan S. Reutsky,

Postgraduate,

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian
Branch

of the Russian Academy of Sciences,

130, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Viktor G. Kurbatsky,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Chief Researcher the Department of Electric Power
Systems No. 40,

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian
Branch

of the Russian Academy of Sciences,

130, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.11.2021; одобрена после рецензирования 04.02.2022; принята к публикации 24.05.2022.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 25.11.2021; approved after reviewing 04.02.2022; accepted for publication 24.05.2022.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.311:621.314.5

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-310-319>

Управление мощностью электронагревательных элементов тиристорными преобразователями напряжения и сопротивления

Альбина Владимировна Рудых^{1✉}, Сергей Владимирович Сукьясов²^{1,2}*Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского,**Иркутская область, Иркутский р-н, п. Молодежный, Россия*¹*avr3004@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9836-6753>*²*sukyasov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7369-5593>*

Резюме. Цель – исследование энергетической эффективности использования тиристорных преобразователей с активной нагрузкой. Преобразование электрической энергии в установке тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент рассмотрены с позиции теории электромагнитного поля. Для расчета энергетических характеристик установки тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент была использована программа MatLab. Установлено, что при использовании тиристорных преобразователей напряжения в режимах управления мощностью активной нагрузки во время непроводящего состояния преобразователя (тиристор заперт) на входе установки возникает пассивная мощность. Показано, что за счет полного использования напряжения, без увеличения потребления тока, с помощью пассивной мощности можно получить дополнительную тепловую энергию. С увеличением глубины регулирования мощностью электронагревательных элементов тиристорными преобразователями напряжения пассивная мощность значительно возрастает. В диапазоне управления активной мощностью (50–100% от номинальной величины) значение коэффициента, учитывающего изменение полной мощности в преобразователе из-за неполного использования напряжения на входе электроустановки, уменьшается с 1,0 до 0,93. Это вызывает снижение коэффициента мощности преобразователя с нагрузкой с 0,97 до 0,925. Показано, что, несмотря на высокое значение коэффициента мощности нагрузки (в интервале управления 0–50% от номинального значения мощности), коэффициент, отвечающий за изменение полной мощности, уменьшается до 0,66, вследствие чего коэффициент мощности преобразователя с нагрузкой снижается ~ на 33%. С целью повышения эффективности преобразования электрической энергии для управления мощностью активной нагрузки предлагается использовать тиристорные преобразователи сопротивления, которые во времени изменяют электрическое сопротивление нагрузки. Показано, что причиной неудовлетворительной работы тиристорного преобразователя напряжения является неэффективное использование напряжения на входе установки тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент. При использовании тиристорных преобразователей сопротивления коэффициент несинусоидальности тока не превышает 1,5%, а коэффициент несинусоидальности напряжения в сети 0,38 кВ не превышает 0,2%.

Ключевые слова: тиристорный преобразователь, активная нагрузка, мощность, электрическая цепь, силовые полупроводниковые приборы, энергетические характеристики установки

Для цитирования: Рудых А. В., Сукьясов С. В. Управление мощностью электронагревательных элементов тиристорными преобразователями напряжения и сопротивления // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 310–319. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-310-319>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Power control of electric heating elements using thyristor voltage and resistance converters

Albina V. Rudykh^{1✉}, Sergey V. Sukyasov²*Irkutsk State University of Agriculture named after A. A. Ezhevsky, Molodezny settlement, Irkutsk region, Russia*¹*avr3004@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9836-6753>*²*sukyasov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7369-5593>*

Abstract. This article investigates the energy efficiency of thyristor converters with an active load. The conversion of electric energy in a “thyristor converter – electric heating element” installation is considered from the standpoint of electromagnetic theory. The energy characteristics of the considered installation was calculated in the MATLAB environment. When thyristor voltage converters are operated under the mode of controlling the power of active load, passive power was found to be generated at the input during the non-conductive state of the converter (thyristor is locked). The use of passive power allows additional thermal energy to be obtained by means of an extensive use of voltage, without increasing the current consumption. An increase in the depth of power control of electric heating elements by thyristor voltage converters leads to a significant increase in passive power. In the active power control range (50–100% of the nominal value), the factor accounting for variations in the total power in the converter due to an incomplete use of the voltage at the input of the considered installation decreases from 1.0 to 0.93. This reduces the power factor of the load converter from 0.97 to 0.925. Despite the high value of the load power factor (in the control interval 0–50% of the rated power value), the factor accounting for variations in the total power was found to be reduced to 0.66. As a result, the power factor of the converter with the load is reduced by ~ 33%. In order to increase the efficiency of converting electrical energy to control the active load power, it is proposed to use thyristor resistance converters that vary the electrical resistance of the load over time. It is shown that unsatisfactory operation of a thyristor voltage converter can be caused by inefficient use of voltage at the input of the “thyristor converter – electric heating element” installation. When using thyristor resistance converters, the current non-sinusoidality factor does not exceed 1.5% and the voltage non-sinusoidality factor in a 0.38 kV network does not exceed 0.2%.

Keywords: thyristor converter, active load, power, electrical circuit, power semiconductor devices, plant energy characteristics

For citation: Rudykh A. V., Sukyasov S. V. Power control of electric heating elements using thyristor voltage and resistance converters. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):310-319. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-310-319>.

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия используется во всех сферах деятельности человека. На предприятиях производства и переработки продукции значительная часть вырабатываемой электроэнергии расходуется на преобразование ее в тепловую энергию. Многие технологические процессы на производстве требуют точного и плавного изменения мощности электронагревательных элементов [1]. Для управления мощностью электронагревательных элементов используются контактные и бесконтактные средства управления. Широко применяемые контактно-релейные устройства для управления активной мощностью не соответствуют предъявленным требованиям ряда технологических процессов и имеют низкую степень надежности. Решение этой проблемы может быть выполнено с помощью силовых полупроводниковых приборов – тиристорных преобразователей [2, 3]. Управление мощностью электронагревательных элементов в большинстве случаев осуществляется тиристорными преобразователями напряжения, которые изготавливаются промышленно. Данные технические устройства выполняют требования тепловых

технологических процессов. Однако имеют ряд значимых недостатков, таких как низкая энергетическая эффективность в режимах управления, отрицательное влияние на показатели качества электрической энергии в распределительных сетях³ [4, 5].

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТИРИСТОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

В практической электротехнике при расчете энергетических характеристик зачастую в состав полной мощности включается мощность искажения. Однако в основном законе преобразования электрической энергии (теорема Умова – Пойнтинга) данная составляющая полной мощности отсутствует.

Энергетические соотношения в электромагнитном поле описаны теоремой Умова – Пойнтинга (закон сохранения энергии в электромагнитном поле):

$$\begin{aligned} & -\oint_S (\vec{E} \cdot \vec{H}) \cdot dS = \\ & = \int_V \vec{\delta} \cdot \vec{E} \cdot dV + \int_V \left(\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot dV, \end{aligned} \quad (1)$$

³Абрамов В. М. Электронные элементы устройств автоматического управления: схемы, расчет, справочные данные. М.: Изд-во «Академкнига», 2006. 680 с.

где $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; $\vec{D}$ – вектор электрической индукции (смещения); $\vec{\delta}$ – вектор плотности тока проводимости; S – площадь поверхности, ограждающая объем V .

Для электрических установок, имеющих исключительно активный характер нагрузки (электронагревательные элементы) и управляемых тиристорными преобразователями, теорему Умова – Пойнтинга можно записать в следующем виде:

$$-\left[\oint_s (\vec{E}_{ex} \cdot \vec{H}_{ex}) \cdot dS - \oint_s (\vec{E}_n \cdot \vec{H}_n) \cdot dS\right] = \int_v \vec{\delta} \cdot \vec{E} \cdot dV, \quad (2)$$

где $\oint_s (\vec{E}_{ex} \cdot \vec{H}_{ex})$ – поток электромагнитной энергии, поступивший на вход тиристорного преобразователя; $\oint_s (\vec{E}_n \cdot \vec{H}_n)$ – поток электромагнитной энергии на входе тиристорного преобразователя, который не поступает к нагрузке; $\int_v \vec{\delta} \cdot \vec{E} \cdot dV$ – электромагнитная энергия, преобразованная в тепловую энергию.

Физический смысл выражения (2) заключается в следующем. Управление мощностью активной нагрузки происходит за счет проводящего и непроводящего состояний силового полупроводникового прибора (открытое и закрытое состояние тиристора) [6–8]. Поток электромагнитной энергии на входе тиристорного преобразователя, который не поступает к электронагревательному элементу, является пассивной мощностью ΔS , величиной, которая возрастает с увеличением угла открывания тиристора.

На основании вышеизложенного выражения (2) можно записать:

$$\sqrt{S_{ex}^2 - \Delta S^2} = P, \quad (3)$$

где S_{ex} – полная мощность на входе установки тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент; P – активная мощность электронагревательного элемента.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что пассивная мощность, образующаяся при использовании тиристорных преобразователей напряжения для управления мощностью электронагревательных элементов, может в значительной мере снижать эффективность преобразования электромагнитной энергии. Безусловно, следует отметить, что негативное влияние использования тиристорных преобразователей напряжения на электрические сети увеличивается с ростом пассивной мощности [9, 10].

Управление мощностью электронагревательных элементов может выполняться с помощью тиристорных преобразователей сопротивления (рис. 1), в которых плавным изменением их входного сопротивления можно добиться увеличения эффективности преобразования электрической энергии в режимах управления.

В номинальном режиме и в режимах управления угол проводимости тиристорov составляет $\beta = 180^\circ$. В зависимости от способа соединения электронагревательных элементов (последовательно, параллельно, смешанно) меняется их электрическое сопротивление. Для изменения способа соединения электрических нагревателей в преобразователи сопротивления используются тиристоры VS3, VS6, VS9. С увеличением электрического сопротивления нагревательных элементов их активная мощность уменьшается. Поданное на установку тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент напряжение используется в полном объеме. Для уменьшения отрицательного воздействия тиристорov на питающую сеть управление тиристорами осуществляется модуляцией на низкой частоте [11, 12].

На рис. 2 представлены временные диаграммы напряжений на электронагревательных элементах одной секции установки, поясняющие режимы управления модуляцией на низкой частоте.

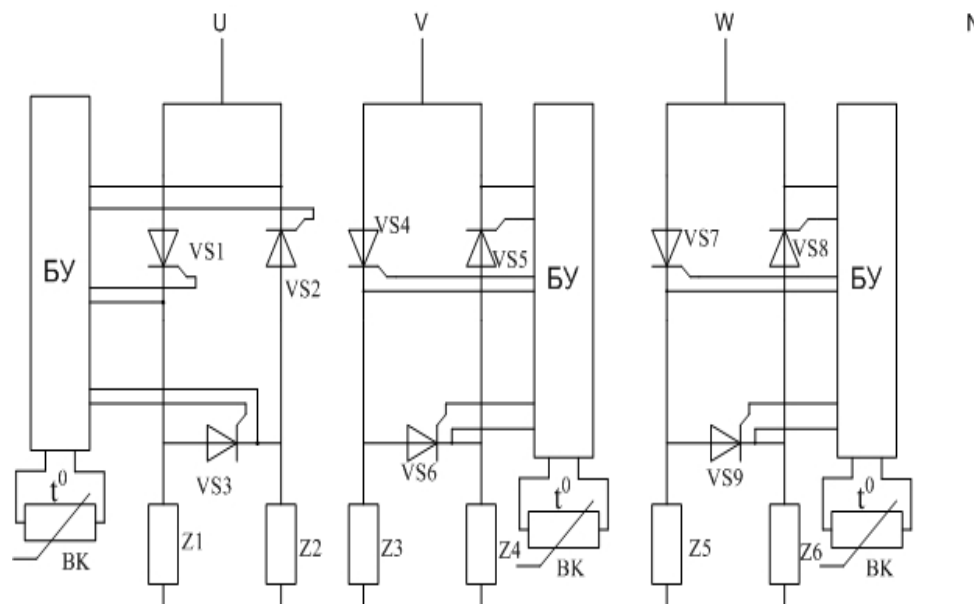


Рис. 1. Силовая схема тиристорного преобразователя сопротивления с активной нагрузкой
Fig. 1. Power circuit of a thyristor resistance converter with an active load

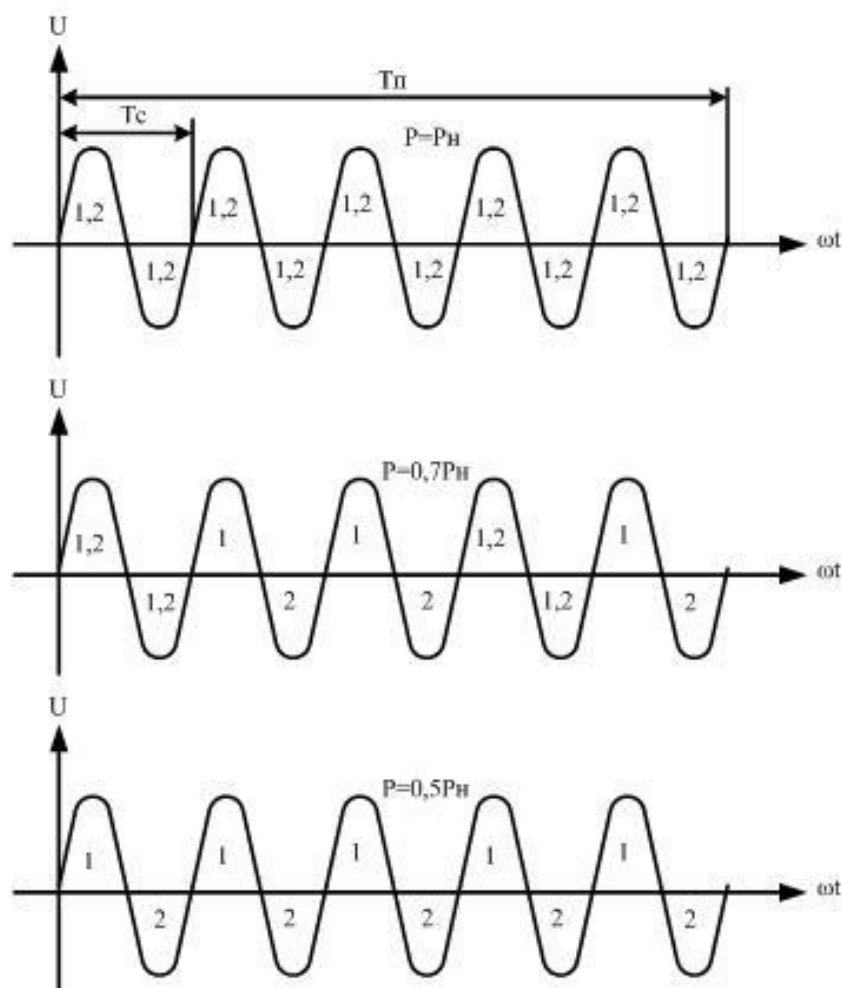


Рис. 2. Временные диаграммы напряжений на электронагревателях в режимах управления полупроводниковыми преобразователями сопротивления
Fig. 2. Time diagrams of electric heater voltages in control modes of semiconductor resistance converters

В номинальном режиме работы проводящее состояние тиристора VS3 – подача напряжения на электронагревательные элементы Z1 и Z2 в положительный и отрицательный полупериоды напряжения сети. В режиме управления мощностью $0,7P_n$, в первый период напряжения сети, электронагревательные элементы работают как в номинальном режиме. Во второй и третий периоды, в положительные полупериоды напряжения сети, напряжение подается на электронагревательный элемент Z1; в отрицательный полупериод – на Z2 (тиристор VS3 заперт). Четвертый период напряжения сети – работа установки аналогична первому периоду, а пятый период аналогичен второму и третьему периодам. Период повторения T_n равен пяти периодам напряжения сети.

Исследование установки тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент (как единый элемент электрической цепи) не позволяет установить действительные причины снижения эффективности преобразования электрической энергии в тепловую энергию в режимах управления [13–15]. Тиристорный преобразователь и электрический элемент, являясь отдельными элементами цепи, имеют свои энергетические характеристики. Оценивать эффективность преобразования электрической энергии необходимо как установки в целом, так и ее отдельных элементов [16]. Для оценки эффективности преобразования электрической энергии в тепловую энергию использованы коэффициент мощности преобразователя с нагрузкой, коэффициент преобразования электрической энергии (разница полной мощности на входе и выходе преобразователя), коэффициент мощности нагрузки [17–20].

Коэффициент мощности преобразователя с нагрузкой:

$$K_m = \frac{P}{S_{\text{ex}}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + \Delta S^2}} \cdot K_n = K_n \cdot K_n, \quad (4)$$

где $K_n = \frac{P}{\sqrt{P^2 + \Delta S^2}}$ – коэффициент преоб-

разования электрической энергии (разница между полной мощностью на входе и выходе преобразователя); K_n – коэффициент мощности нагрузки.

Коэффициент мощности тиристорных преобразователей зависит от переменных потерь мощности в них. Потери мощности в тиристорах определяются пороговым напряжением, средним значением тока в проводящем состоянии тиристора, коэффициентом формы тока и динамическим сопротивлением тиристора. В номинальных режимах работы электроустановок коэффициент мощности тиристорных для различных типов в среднем составляет 0,98 о.е. [5]. При работе тиристорных на частоте меньше 400 Гц дополнительные потери незначительны и при расчетах не учитываются.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились с разработанным тиристорным преобразователем сопротивления и тиристорным преобразователем напряжения, изготовителем которых является ОАО «Завод «Инвертор» (рис. 3).

Измерения токов, напряжений и мощностей проводились по общеустановленной методике. Для расчета энергетических характеристик установки тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент была использована программа MatLab.

На основании проведенных исследований получены результаты, позволяющие оценить энергетическую эффективность использования тиристорных преобразователей напряжения и сопротивления (табл. 1, 2).

В табл. 1 и 2 режим 1 соответствует номинальному режиму работы установки; режимы 2–5 и 2–4 соответствуют режимам управления мощностью электронагревательных элементов.

В результате проведенных исследований выявлено, что снижение энергетических характеристик установки тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент происходит по мере увеличения глубины регулирования.



a



b

Рис. 3. Силовые полупроводниковые преобразователи (изготовитель ОАО Завод «Инвертор»):
a – разработанный тиристорный преобразователь сопротивления;
b – тиристорный преобразователь напряжения
Fig. 3. Power semiconductor converters (produced by JSC Plant "Inverter"):
a – developed thyristor resistance converter; b – thyristor voltage converter

Таблица 1. Энергетические характеристики тиристорного преобразователя напряжения с фазовым управлением
Table 1. Energy characteristics of a phase-controlled thyristor voltage converter

Показатели \ Режим	1	2	3	4	5
$U_{вх}, В$	185,0	196,4	204,0	206,4	210,8
$I, А$	83,25	61,5	48,6	42,0	32,7
$P, кВт$	8,7	5,1	3,48	2,7	1,8
$U_{вых}, В$	175,0	161,4	145,8	137,1	126,3
$S_{вх}, кВА$	15,4	12,08	9,91	8,67	6,89
$S_{вых}, кВ·А$	15,4	9,86	7,08	5,76	4,13
$\Delta S, кВ·А$	–	2,12	2,77	2,88	3,77
$K_{п}, о.е.$	1,0	0,82	0,71	0,66	0,6
$K_{н}, о.е.$	0,56	0,51	0,49	0,47	0,43
$K_{м}, о.е.$	0,56	0,42	0,35	0,31	0,26

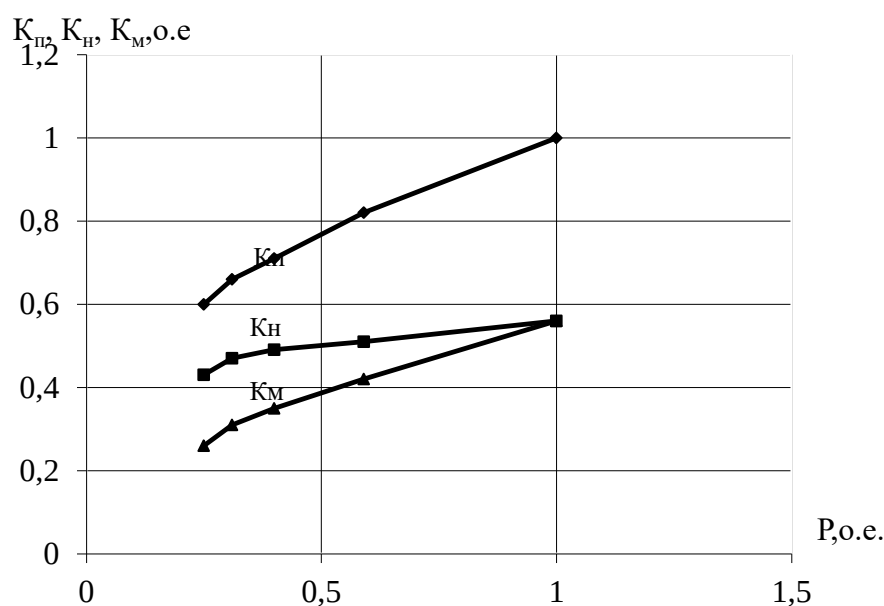
Таблица 2. Энергетические характеристики тиристорного преобразователя сопротивления с управлением модуляцией на низкой частоте**Table 1.** Energy characteristics of a thyristor resistance converter with low frequency modulation control

Показатели \ Режим	1	2	3	4
$U_{вх}$, В	189,0	200,0	208,0	220,0
I , А	88,2	72,0	48,75	34,5
P , кВт	16,2	13,32	9,9	4,95
$U_{вых}$, В	121,0	86,0	134,0	95,0
$S_{вх}$, кВт·А	16,67	14,4	10,14	7,59
$S_{вых}$, кВт·А	16,67	13,43	10,14	5,04
ΔS , кВт·А	–	0,97	–	2,55
$K_{п}$, о.е.	1,0	0,93	1,0	0,66
$K_{н}$, о.е.	0,97	0,99	0,98	0,98
$K_{м}$, о.е.	0,97	0,925	0,98	0,65

На рис. 4 и 5 представлены зависимости коэффициентов $K_{м}$, $K_{п}$, $K_{н}$ при управлении мощностью электронагревательных элементов тиристорными преобразователями напряжения и сопротивления.

Исследованиями установлено, что в режимах управления мощностью электронагревательных элементов тиристорными преобразователями напряжения коэффициент мощности установки тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент значительно снижается, что вызвано неполным использованием поданного на систему напряжения [18], это сопровождается появлением пассивной мощности (см. рис. 4). Она

является одним из решающих факторов, оказывающих значительное влияние на энергетические характеристики установки тиристорный преобразователь–электронагревательный элемент. Повысить коэффициент преобразования электрической энергии, коэффициенты мощности, как отдельных элементов, так и установки в целом, можно путем использования тиристорного преобразователя сопротивления (см. рис. 5). Авторами установлено, что использование тиристорных преобразователей сопротивления позволяет практически исключить появление электромагнитных помех.

**Рис. 4.** Зависимость коэффициентов $K_{м}$, $K_{п}$, $K_{н}$ от активной мощности (тиристорный преобразователь напряжения)**Fig. 4.** Coefficients $K_{м}$, $K_{п}$, $K_{н}$ vs active power (thyristor voltage converter)

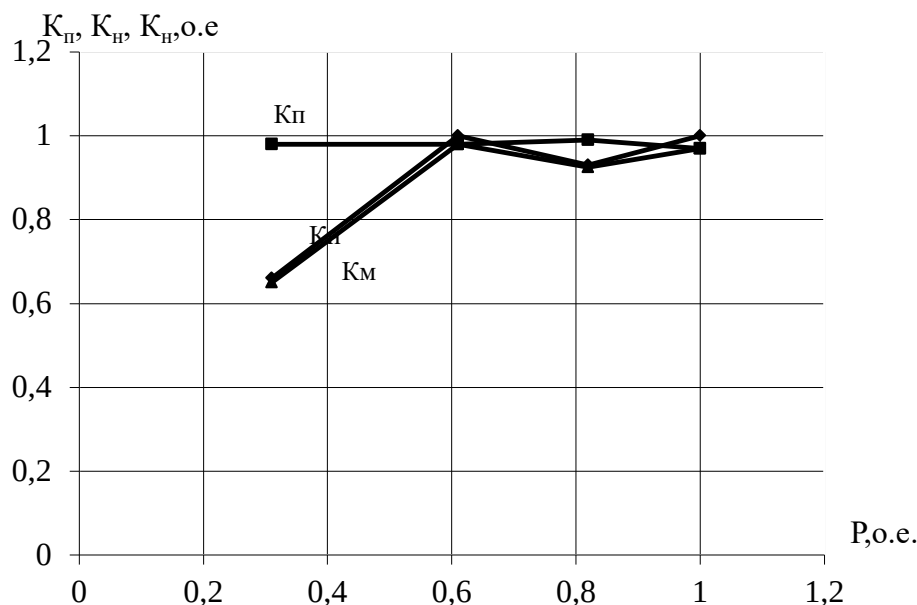


Рис. 5. Зависимость коэффициентов K_m , K_n , $K_{n,о.е.}$ от активной мощности (тиристорный преобразователь сопротивления)
 Fig. 5. Coefficients K_m , K_n , $K_{n,о.е.}$ vs active power (thyristor resistance converter)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование тиристорных преобразователей напряжения для управления мощностью электронагревательных элементов сопровождается значительным снижением коэффициента установки в целом. В сети появляются значительные искажения кривых силы тока и напряжения. Устранить данные недостатки можно использованием тири-

сторных преобразователей сопротивления. За счет плавного изменения мощности нагрузки можно точно поддерживать требования теплового технологического процесса, не ухудшая показатели качества электрической энергии, и получить значительную экономию электроэнергии за счет отсутствия пассивной мощности на входе установки.

Список источников

1. Conrad H., Krampitz R. Elektrotechnik. Berlin: VEB Verlag Technik, 1983. 362 p.
2. Рудых А. В., Боннет В. В. Возможность управления электрическим обогревом с помощью преобразователей сопротивления // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 23–24 мая 2019 г.). Изд-во Иркутского ГАУ им. А. А. Ежовского, 2019. С. 51–56.
3. Klimash V. S., Thu Ye Min. Generalized mathematical description and simulation of grid-tied thyristor converters // International Journal of Energy and Power Engineering. 2017. Vol. 11. No. 11. P. 1135–1142. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1132767>.
4. Bakas P., Okazaki Yuhei, Shukla A., Patro S. K., Ilves K., Dijkhuizen F., et al. Review of Hybrid Multilevel Converter Topologies Utilizing Thyristors for HVDC Applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. Vol. 36. Iss. 1. P. 174–190. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2997961>.
5. Huang W. A new control for multi-phase buck converter with fast transient response // Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2001. <https://doi.org/10.1109/APEC.2001.911660>.
6. Jalili K., Weitendorf N., Bernet S. Behavior of PWM active front ends in the presence of parallel thyristor converters // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55. Iss. 3. P. 1035–1046. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.917079>.
7. Алексеева Т. Л., Рябченко Н. Л., Астраханцев Л. А., Тихомиров В. А., Алексеев М. Е. Повышение эффективности рекуперации электрической энергии в электрических сетях переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 2(62). С. 86–97. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2\(62\).86-97](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).86-97).
8. Patro S. K., Shukla A. Highly efficient fault-tolerant modular embedded thyristor directed converter for HVDC applications // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. Iss. 1. P. 349–363. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2951535>.
9. Judge P. D., Merlin M. M. C., Green T. C., Trainer D. R. Thyristor/diode-bypassed submodule power groups

for improved efficiency in modular multilevel converters // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. Vol. 34. Iss. 1. P. 84–94. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2843390>.

10. Алексеева Т. Л., Рябченко Н. Л., Астраханцев Л. А., Тихомиров В. А. Энергетическая эффективность в электрических цепях с полупроводниковыми приборами // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2020. Т. 20. № 2. С. 89–98. <https://doi.org/10.14529/power200208>.

11. Vobecky J. The bidirectional phase control thyristor // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2020. Vol. 67. Iss. 7. P. 2844–2849. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2991690>.

12. Голодный И. М., Синявский А. Ю., Санченко А. В. Исследование трехфазного асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения с фазоимпульсным управлением // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства*. 2017. № 4. С. 139–143.

13. Wang Shuren, Massoud A. M., Williams B. W. A t-type modular multilevel converter // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. Vol. 9. Iss. 1. P. 843–857. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953007>.

14. Кадомский Д. Е. Активная и реактивная мощности – характеристики средних значений работы и энергии

периодического электромагнитного поля в элементах нелинейной цепи // *Электричество*. 1987. № 7. С. 39–43.

15. Пястолов А. А., Астраханцев Л. А. Эффективность способов управления активной мощностью сопротивлений // *Техника в сельском хозяйстве*. 1990. № 6. С. 35–37.

16. Пат. № 2367082, Российская Федерация, МПК H20M 7/19. Способ регулирования напряжения и устройство трехфазного выпрямителя / А. В. Рудых, Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко, Н. М. Астраханцева, А. И. Орленко, К. П. Рябченко, М. Е. Алексеев; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. № 2008103618/09. Заявл. 29.01.2008; опубл. 10.09.2009. Бюл. № 25.

17. Heumann K. Grundlagen der Leistungselektronik. Stuttgart: Teubner, 1989. 407 p.

18. Шустов М. А. Основы силовой электроники. М.: Изд-во «Наука и техника», 2017. 336 с.

19. Tian Shuilin, Lee Fred C., Li Qiang, Yan Yingyi. Unified equivalent circuit model and optimal design of V2 controlled buck converters // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 31. Iss. 2. P. 1734–1744. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2424913>.

20. Redl R., Sun Jian. Ripple-based control of switching regulators – an overview // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009. Vol. 24. Iss. 12. P. 2669–2680.

References

1. Conrad H., Krampitz R. *Elektrotechnik*. Berlin: VEB Verlag Technik; 1983. 362 p.

2. Rudykh A. V., Bonnet V. V. Control capability of electric heating by means of resistance converters. *Klimat, ekologiya, sel'skoe hozyajstvo Evrazii: trudy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Climate, ecology, agriculture of Eurasia: proceedings of the 8th International scientific and practical conference*. 23–24 May 2019, Irkutsk, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky; 2019, p. 51–56. (In Russ.).

3. Klimash V. S., Thu Ye Min. Generalized mathematical description and simulation of grid-tied thyristor converters. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 2017;11(11):1135–1142. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1132767>.

4. Bakas P., Okazaki Yuhei, Shukla A., Patro S. K., Ilves K., Dijkhuizen F., et al. Review of hybrid multilevel converter topologies utilizing thyristors for HVDC applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021;36(1):174–190. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2997961>.

5. Huang W. A new control for multi-phase buck converter with fast transient response. In: *Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2001. <https://doi.org/10.1109/APEC.2001.911660>.

6. Jalili K., Weitendorf N., Bernet S. Behavior of PWM active front ends in the presence of parallel thyristor converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(3):1035–1046. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.917079>.

7. Alekseeva T. L., Ryabchenok N. L., Astrakhansev

L. A., Tikhomirov V. A., Alekseev M. M. Increase of efficiency of electric energy recovery into a electrical networks. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2019;2(62):86–97. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2\(62\).86-97](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2019.2(62).86-97).

8. Patro S. K., Shukla A. Highly efficient fault-tolerant modular embedded thyristor directed converter for HVDC applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020;35(1):349–363. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2951535>.

9. Judge P. D., Merlin M. M. C., Green T. C., Trainer D. R. Thyristor/diode-bypassed sub-module power groups for improved efficiency in modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018;34(1):84–94. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2843390>.

10. Alekseyeva T. L., Ryabchenok N. L., Astrakhansev L. A., Tikhomirov V. A. Energy efficiency of electrical circuits carrying semiconductor devices. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2020;20(2):89–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power200208>.

11. Vobecky J. The bidirectional phase control thyristor. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2020;67(7):2844–2849. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2991690>.

12. Golodnyi I., Sinyavsky A., Sanchenko A. Investigation of three-phase asynchronous electric drive with phase-pulse control thyristor voltage regulator. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta elektrif-*

ikacii sel'skogo hozyajstva. 2017;4:139-143. (In Russ.).

13. Wang Shuren, Massoud A. M., Williams B. W. A t-type modular multilevel converter. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021;9(1):843-857. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953007>.

14. Kadomskij D. E. Active and reactive power as characteristics of average values of periodic electromagnetic field efficiency and energy in nonlinear circuit elements. *Elektrichestvo*. 1987;7:39-43. (In Russ.).

15. Pyastolov A. A., Astrahancev L. A. Efficiency of resistance active power control methods. *Tekhnika v sel'skom hozyajstve*. 1990;6:35-37. (In Russ.).

16. Rudykh A. V., Alekseeva T. L., Ryabchenok N. L., Astrahanceva N. M., Orlenko A. I., Ryabchenok K. P., et al. Voltage control method and a three-phase rectifier.

Patent RF, no. 2367082; 2009. (In Russ.).

17. Heumann K. *Grundlagen der Leistungselektronik*. Stuttgart: Teubner; 1989, 407 p.

18. Shustov M. A. *Fundamentals of power electronics*. Moscow: Nauka i tekhnika; 2017, 336 p. (In Russ.).

19. Tian Shuilin, Lee Fred C., Li Qiang, Yan Yingyi. Unified equivalent circuit model and optimal design of V2 controlled buck converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015;31(2):1734-1744. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2424913>.

20. Redl R., Sun Jian. Ripple-based control of switching regulators – an overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009;24(12):2669-2680. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2032657>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рудых Альбина Владимировна,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования и физики,
Иркутский государственный аграрный
университет им. А. А. Ежевского,
664038, Иркутская область, Иркутский р-н,
п. Молодежный, 1/1, Россия

Сукьясов Сергей Владимирович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования и физики,
Иркутский государственный аграрный
университет им. А. А. Ежевского,
664038, Иркутская область, Иркутский р-н,
п. Молодежный, 1/1, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; одобрена после рецензирования 12.04.2022; принята к публикации 07.06.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Albina V. Rudykh,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electrical
Equipment and Physics,
Irkutsk State Agrarian University named
after A.A. Ezhevsky,
1/1, Molodezhny settlement, Irkutsk region,
Irkutsk district, 664038, Russia

Sergey V. Sukyasov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electrical
Equipment and Physics,
Irkutsk State Agrarian University named
after A.A. Ezhevsky,
1/1, Molodezhny settlement, Irkutsk region,
Irkutsk district, 664038, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 08.02.2022; approved after reviewing 12.04.2022; accepted for publication 07.06.2022.



Обзорная статья

УДК 669.02.09

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-320-335>

Анализ возможности применения гидрометаллургических методов с целью улучшения переработки медных концентратов

Анна Андреевна Васильева^{1✉}, Анна Ярославовна Бодуэн²,
Роман Евгеньевич Васильев³

¹⁻³ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

¹fml0914@mail.ru

²Boduen_aya@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3580-4394>

³vasilroman2308@ya.ru

Резюме. Цель – обзор возможных способов переработки низкосортных медных концентратов (в частности существующих гидрометаллургических схем их кондиционирования) на основе анализа научных исследований зарубежных и отечественных ученых. Обзор литературных и информационных источников для анализа существующих технологий переработки некондиционного медного сырья, применение которых является рациональным для более полного извлечения ценных компонентов из исходных материалов. Проведен детальный литературный обзор вариантов гидрометаллургической переработки сырья с точки зрения возможности их применения в кондиционировании низкосортных медьсодержащих материалов и замещения стандартных методов обработки. В частности, были изучены технологии автоклавного (MT Gordon, процессы Platsol, CESL, гидротермальной обработки и др.) и атмосферного видов выщелачивания (технологии HydroCopper, Intec Copper Process, Albion и др.), в результате чего установлено, что разработка и усовершенствование ряда описанных технологий и методов могут быть весьма перспективными для дальнейшего внедрения в производство. Показано, что на сегодняшний день в области переработки медного сырья (в том числе медноколчеданного) ряд вопросов остается нераскрытым в полной мере; в частности, существуют проблемы, связанные с кондиционированием низкосортного сырья. В медноколчеданных рудах содержится значительное количество сульфидов цинка и меди, наиболее полное извлечение которых с помощью современных гидрометаллургических методов позволит усовершенствовать комплексность переработки сырья. В результате анализа научных материалов исследований, посвященных таким методам, был сделан вывод, что одним из весьма перспективных вариантов решения данной задачи может стать процесс Albion. На основе данной технологии в дальнейшем будет проведен ряд опытов для экспериментального подтверждения целесообразности применения указанного способа переработки.

Ключевые слова: медные концентраты, гидрометаллургическое кондиционирование, атмосферное выщелачивание, сульфидное сырье, автоклавное окисление, механоактивация

Для цитирования: Васильева А. А., Бодуэн А. Я., Васильев Р. Е. Анализ возможности применения гидрометаллургических методов с целью улучшения переработки медных концентратов // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 320–335. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-320-335>.

METALLURGY

Review article

The feasibility of hydrometallurgical methods for enhancing the processing of copper concentrates

Anna A. Vasilieva^{1✉}, Anna Ya. Boduen², Roman E. Vasiliev³

¹⁻³ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹fml0914@mail.ru

²Boduen_aya@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3580-4394>

³vasilroman2308@ya.ru

© Васильева А. А., Бодуэн А. Я., Васильев Р. Е., 2022

Abstract. This article analyses available methods for processing low-grade copper concentrates, including existing hydrometallurgical schemes of their conditioning. To this end, we review Russian and foreign publications investigating existing technologies for processing substandard copper raw materials, which are used to deepen the extraction of valuable components from raw materials. Particular attention is paid to the technologies of hydrometallurgical processing of raw materials in terms of their feasibility for conditioning low-grade copper-containing materials as a substitution for conventional processing methods. The most promising technologies in terms of their further development and industrial application were identified among autoclave (MT Gordon, Platsol, CESL, hydrothermal treatment, etc.) and atmospheric leaching (HydroCopper, Intec Copper Process, Albion, etc.) methods. A number of research gaps in the field of copper raw and copper alloy processing were revealed, including problems related to conditioning of low-grade raw materials. Copper ores contain a significant amount of zinc and copper sulphides, whose complete extraction can be achieved using modern hydrometallurgical methods thus contributing to the efficiency of raw materials processing. In this respect, the Albion process seems to be a highly promising solution, thus requiring further studies.

Keywords: copper concentrates, hydrometallurgical conditioning, atmospheric leaching, sulphide raw material, autoclave oxidation, mechanical activation

For citation: Vasilieva A. A., Boduen A. Ya., Vasiliev R.E. The feasibility of hydrometallurgical methods for enhancing the processing of copper concentrates. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):320-335. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-320-335>.

ВВЕДЕНИЕ

Спрос на медь и ее металлы-спутники возрастает с каждым годом. Так, по оценке World Bureau of Metal Statistics (Великобритания), уровень мирового потребления меди за январь–август 2020 г. достиг 16,2 млн т, что на 0,7 млн т выше значения предыдущего года; производство при этом увеличилось на 3,6% относительно 2019 г., что составило 15,8 млн т меди. Дефицит рынка также значительно вырос – на 0,4 млн т [1]. Помимо увеличения потребления и производства меди, важно упомянуть о возрастающей роли использования вторичного сырья (в том числе амортизационный лом и различные отходы производства) при ее получении.

Задача производства металлической продукции из различных видов металлосодержащего сырья является довольно трудной и требующей комплексного подхода к ее решению. При рассмотрении медных и никелевых руд она значительно усложняется, поскольку данный вид руд, как правило, характеризуется относительно бедным и сложным полиметаллическим составом. Именно поэтому металлургическая переработка такого сырья, помимо выделения основного металла, должна обеспечивать комплексное извлечение всех ценных компонентов с максимально возможной при этом степенью их извлечения. На сегодняшний день полнота использования компонентов медного сырья (вне зависимости от того, первичным или вторичным оно является) при его переработке и комплексность применяемых методов далеки

от максимально возможных и рациональных показателей. В широко используемых технологиях переработки ценные компоненты зачастую недоизвлекаются или полностью теряются, в то время как они могли бы быть извлечены из исходного сырья в виде готового продукта. Основные способы переработки медно-цинкового сырья на сегодняшний день основаны по большей части на пирометаллургических операциях, в ходе которых имеет место полная потеря цинка, связанная с переходом металла в шлак медной плавки. Гидрометаллургические подходы можно рассматривать как альтернативный вариант пирометаллургическим технологиям для извлечения металлов из некондиционных руд и концентратов [2]. Тем не менее стоит отметить, что в случае применения гидрометаллургических схем может возникать ряд сложностей. В частности, в настоящее время весьма проблематичной является переработка сульфидного медно-цинкового сырья с низким содержанием цинка (до 18%), поскольку существующие эксплуатируемые гидрометаллургические методы позволяют получить лишь такие растворы, которые из-за низкого содержания цинка в их составе в дальнейшем не могут быть использованы для получения товарной продукции.

МЕТОДЫ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ МЕДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

В последние десятилетия медная промышленность столкнулась с проблемой ис-

тощения богатых и легко перерабатываемых руд [3]. Первичные и вторичные источники цветных металлов постепенно становятся более комплексными. В связи с этим в статье [4] рассматривается влияние возрастающей комплексности ресурсов как на их добычу, так и на непосредственно сам процесс переработки, при этом авторами подчеркивается необходимость применения интегрированного подхода к переработке для достижения рациональных показателей извлечения нескольких металлов как с экономической, так и с экологической точек зрения.

Существует ряд способов, направленных на улучшение технологических показателей и, как следствие, на улучшение экономических показателей технологии переработки; в их числе гидрометаллургические методы, в первую очередь включающие в себя методы автоклавного и атмосферного выщелачивания.

Большинство существующих работ и исследований посвящены автоклавным методам кондиционирования и переработки, результаты которых представлены в литературных источниках [5–9], методам же атмосферного выщелачивания уделено намного меньше внимания⁴ [10–29]. О возможности применения перечисленных вариантов более подробно будет изложено в соответствующих разделах настоящей статьи.

Автоклавное выщелачивание. Как было отмечено ранее, одним из способов, позволяющих повысить показатели переработки сульфидных материалов (в частности, медного сырья с высоким содержанием цинка), а также сокращающих степень использования пирометаллургических процессов при переработке медно-цинкового сырья, является автоклавное выщелачивание, большая температура и сильное давление газа которого обеспечивают довольно высокую скорость вскрытия сырья.

Помимо ряда существующих опубликованных патентов, посвященных способам переработки сульфидного медно-цинкового сырья, а также улучшению показателей извле-

чения ценных компонентов, рассмотренная в них тематика изучена авторами литературных источников [5–20]. Например, были рассмотрены вопросы повышения качества низкосортного медного сырья и взаимосвязи между качеством медного концентрата и эффективностью его переработки, а также проведены оценки и сравнения различных технологий, как применяемых в современном производстве, так и представляющих перспективу для дальнейшего их внедрения.

С каждым годом неизбежным становится вовлечение в переработку материалов со значительно более низкими показателями содержания ценных компонентов; в частности, колчеданные медно-цинковые руды, на сегодняшний день являющиеся основным источником для получения медных и цинковых концентратов, – яркий пример комплексных руд, обогащение которых с высокими выходными показателями является весьма затруднительным [6].

Для более полного понимания существующих гидрометаллургических технологий их переработки имеет смысл рассмотреть технологические схемы и основные химические реакции процессов более подробно.

Проект «MT Gordon» (1998 г.) разработан австралийской компанией «Western Metals Resources Ltd». Принципиальная схема технологии, основу которой составляет низкотемпературное автоклавное окисление, представлена на рис. 1 [7]. Для более полного извлечения ценных компонентов из используемого сырья (в том числе из трудно-вскрываемых минералов) дополнительной операцией технологии является атмосферное выщелачивание. В частности, на заводе «MT Gordon» медь в соединении халькозина почти полностью окислялась на стадии автоклавного процесса, при этом для окисления халькопирита было применено дополнительное сверхтонкое измельчение с последующей стадией атмосферного выщелачивания, после чего полученный раствор поступал на

⁴Albion Process. Simplicity in leaching. Introduction to the Albion Process // Albion Process™ Simplicity in leaching [Электронный ресурс]. URL: <https://www.albionprocess.com/en/Pages/home.aspx> (08.03.2021).

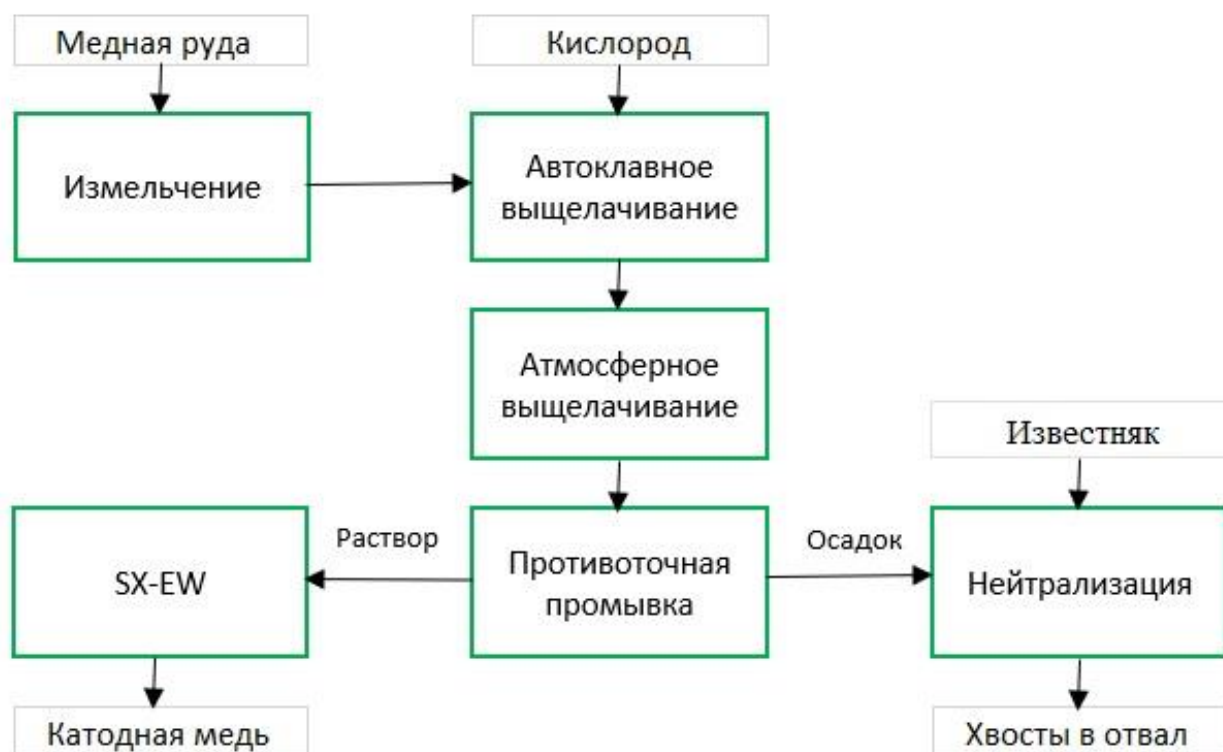


Рис. 1. Технологическая схема завода «MT Gordon»
 Fig. 1. Process flow diagram of the MT Gordon plant

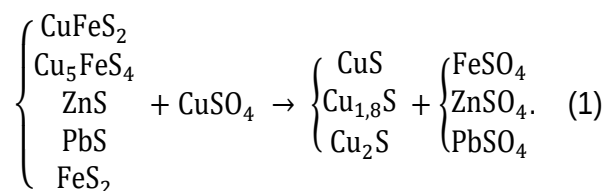
переработку по схеме электролитического осаждения меди SX-EW (от англ. «solvent extraction-electrowinning»).

Процесс *Plattsol* основан на автоклавном окислении сульфидного сырья в присутствии хлорида иона в количестве 5–10 г/дм³ [8], схема представлена на рис. 2. Преимуществом данной технологии является то, что в применяемых условиях ($t = 220^\circ\text{C}$; избыточное давление кислорода – $7 \cdot 10^5$ Па), помимо растворения сульфидов в раствор, с образованием хлоридных комплексов также переходят металлы платиновой группы и золото.

В 2008 г. компанией «Vale» (Бразилия) была разработана технология *CESL* [9]. В ее основе стоит автоклавное окисление концентратов в течение 1 ч (при $t = 150^\circ\text{C}$ $P = 0,9\text{--}1,0$ МПа), предварительно измельченных до крупности 95% частиц класса 45 мкм. Технологическая схема *CESL* изображена на рис. 3. Стоит отметить, что данный процесс характеризуется своей малочувствительностью к составу сырья и относительно низкой капиталоемкостью.

Еще одной технологией, протекающей в автоклавных условиях ($t \geq 150^\circ\text{C}$ и $P \geq 0,6$ МПа), является процесс ГТО (гидротермаль-

ная обработка). Выделяют два варианта ГТО: при $t = 150\text{--}170^\circ\text{C}$ (среднетемпературный процесс) и $t = 210\text{--}220^\circ\text{C}$ (высокотемпературный процесс). Процесс ГТО использует комплекс обменных реакций с участием сульфидов и ионов Cu^{2+} . Следующая схема уравнений объединяет основные реакции, имеющие место в ходе применения гидротермальной обработки:



Одним из вариантов высокотемпературного процесса ГТО является процесс *NONOX* [10], который включен в схему Hydromet компании «OZ Minerals» (рис. 4).

В результате более высоких температурных показателей ($> 200^\circ\text{C}$) осуществляется наиболее полный переход сульфидов меди в форму халькозина, и, как следствие, повышение уровня содержания меди в конечном концентрате до 55–60%.

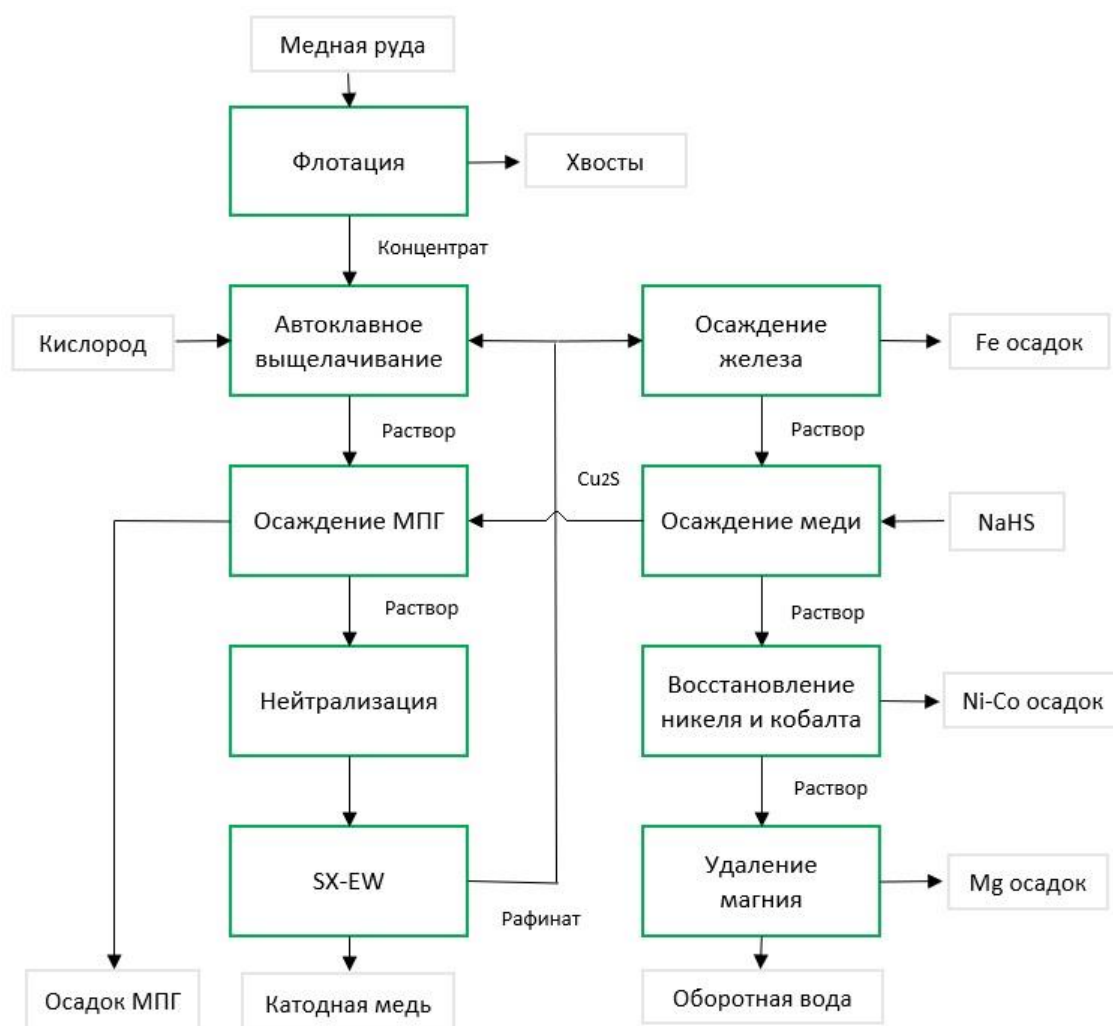
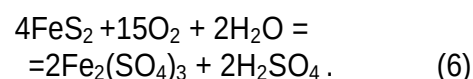
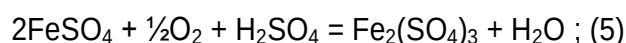
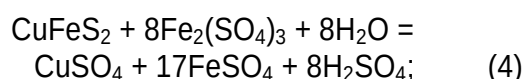
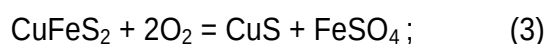
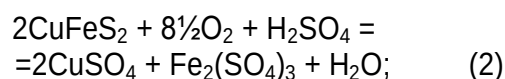


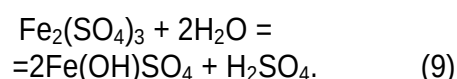
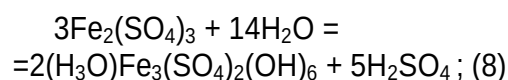
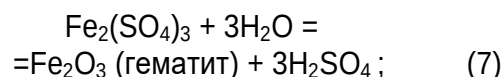
Рис. 2. Технологическая схема процесса Platsol
Fig. 2. Platsol process flow diagram

Также немаловажным является рассмотрение основных реакций, протекающих в процессе выщелачивания. В частности, изучение химизма сернокислотного автоклавного окислительного выщелачивания при переработке медных, в том числе содержащих халькопирит, руд и концентратов.

Химизм процессов окисления пирита и халькопирита при высокотемпературном выщелачивании можно представить в виде реакций:



При этом $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, который образуется и накапливается в ходе процесса выщелачивания, склонен к гидролизу:



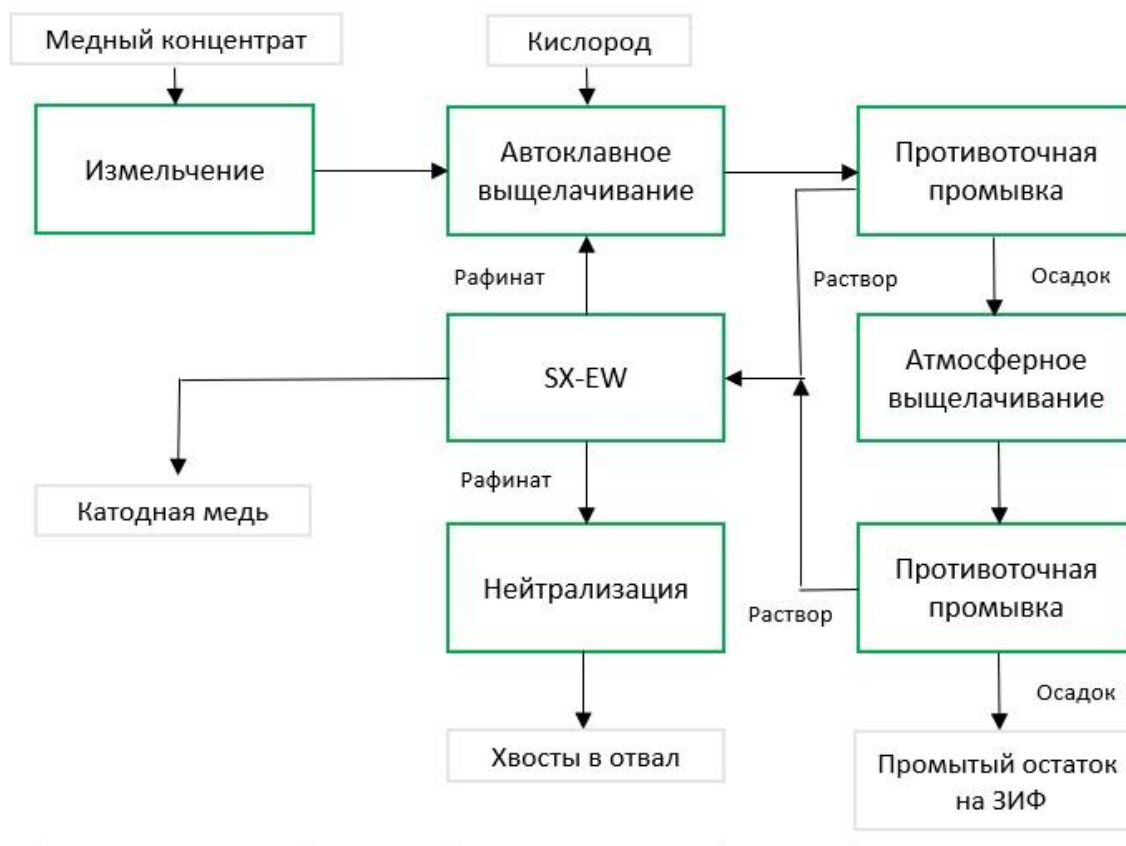


Рис. 3. Технологическая схема процесса CESL
Fig. 3. CESL process flow diagram

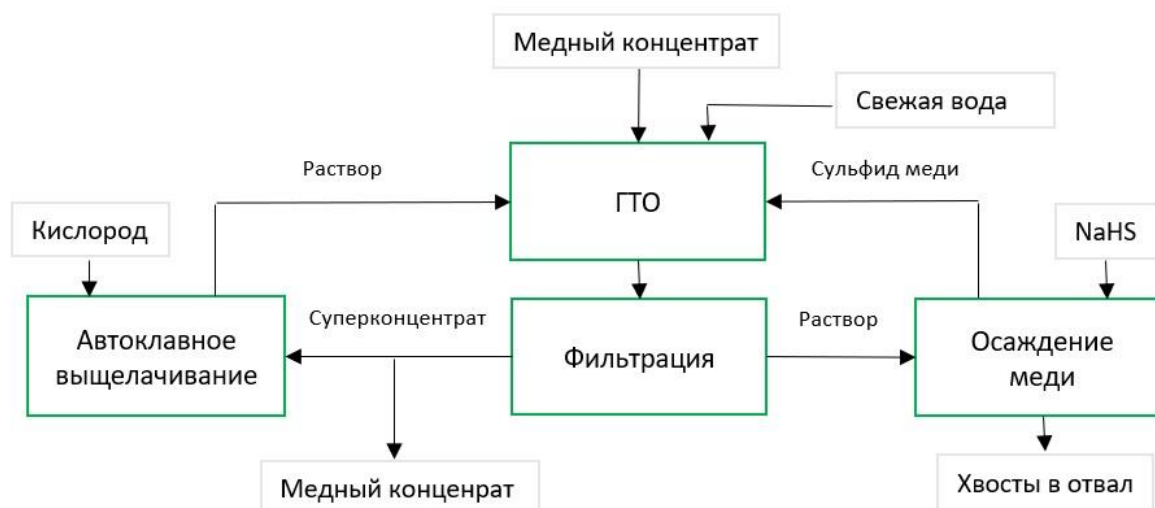


Рис. 4. Технологическая схема процесса Hydromet компании «OZ Minerals»
Fig. 4. Hydromet process flow diagram at the OZ Minerals company

Атмосферное выщелачивание. На сегодняшний день важным моментом является тот факт, что активный рост числа и масштабов хвостохранилищ, в которых зачастую сконцентрировано весьма высокое и рациональное для дальнейшей переработки коли-

чество ценных компонентов в виде цветных и благородных металлов, позволяет рассматривать их в качестве техногенного сырья для их дальнейшего доизвлечения. Следовательно, существует необходимость в разработке и улучшении гидрометаллургических

технологий извлечения полезных компонентов из низкосортного сырья. За последние годы было разработано множество способов извлечения полезных компонентов из низкосортного сырья, в том числе меди из сульфидных концентратов.

Например, для максимального извлечения меди, в частности из халькопирита, были исследованы и разработаны следующие варианты технологических решений:

1) применение высокотемпературного процесса, разумно контролируемого в условиях атмосферного давления (например, BioCOP™ – Дж. Д. Бэтти и Дж. В. Порке, 2006 г.);

2) использование тонкого измельчения для увеличения реакционной способности без проявления пассивации (например, Mintek/Bactech – Ван Стаден, 1998 г.);

3) использование специальных добавок (например, Galvanox™ – Dixon, 2008 г.);

4) применение инновационных комбинаций технологий переработки (например, про-

цесс Geocoat® – Harvey and Bath, 2007);

5) технологии Intec Copper Process, Albion, HydroCopper.

Технология HydroCopper (2005 г.) основывается на хлоридном двухстадийном выщелачивании халькопиритного концентрата при атмосферном давлении (при $t = 85\text{--}95^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 1,5\text{--}2,5$) [11]. Ее принципиальная схема приведена на рис. 7. Важные преимущества (неполный перечень) данной схемы заключаются в регенерации водорода и хлора внутри схемы, в высоком извлечении ценных компонентов и удалении элементной серы с гетитом.

Технология Intec Copper Process (рис. 6), разработанная в 2009 г. [12], заключается в противоточном выщелачивании (при $t = 80\text{--}85^\circ\text{C}$) предварительно измельченного концентрата ($P_{80} = 25\text{ мкм}$) с введением галогенидов (CaCl_2 и CaBr_2) и дальнейшем электролитическом осаждении меди в ваннах с диафрагмой.



Рис. 5. Технологическая схема процесса HydroCopper
Fig. 5. HydroCopper process flow diagram

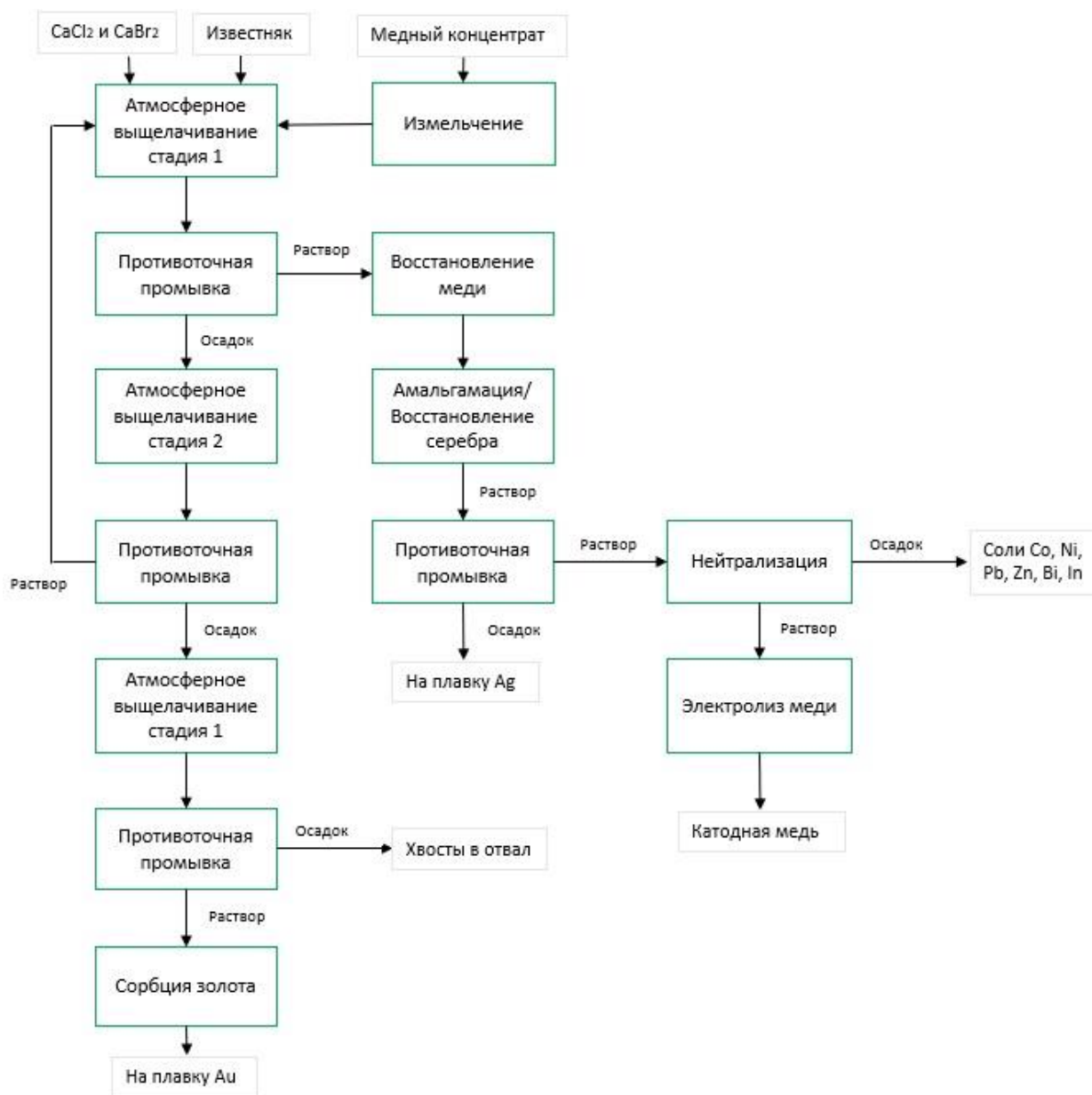
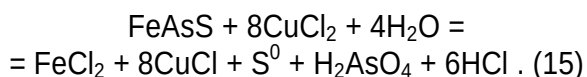
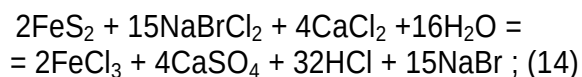
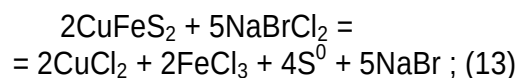
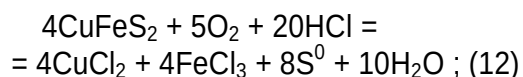


Рис. 6. Технологическая схема процесса Intec Copper Process
Fig. 6. Intec Copper Process flow diagram

Основные реакции процесса Intec:



Основными достоинствами технологии являются следующие: низкие капиталовложения относительно пирометаллургических и гидрометаллургических автоклавных схем, возможность переработки концентратов различного состава, отсутствие жидкостной экстракции (SX), низкая стоимость электролиза (медь Cu^+ вместо Cu^{2+}). При этом данная технология сопровождается рядом недостатков: при использовании хлоридных схем требуются токсичные газообразные реагенты, развитые схемы аспирации и утилизации хлорсодержащих стоков, а также необходимо

применение оборудования с повышенной коррозионной стойкостью.

Процесс Albion разработан в 1994 г. компанией «Glencore» [13]. Результативность применения данной технологии подробно показана авторами работ [14–16] на примере переработки золотосодержащих концентратов. В целом данная технология является нетребовательной к составу сырья, что позволяет сделать рентабельной переработку низкосортных концентратов, в том числе медных. Также капитальные затраты данной технологии значительно меньше относительно автоклавного способа. Принципиальная технологическая схема представлена на рис. 7.

Выщелачивание осуществляется автотермически, а температура пульпы определяется количеством тепла, выделяемого в результате реакции выщелачивания. Непосредственно для сульфидных концентратов, содержащих минералы таких цветных металлов как медь, цинк, никель, кобальт, наиболее подходящими условиями окислительного выщелачивания будут кислые.

Преимуществом выщелачивания по данной технологии является предотвращение пассивации выщелачиваемого минерала продуктами реакции выщелачивания за счет ультратонкого измельчения материала (до крупности 80% класса 10–12 мкм).

Таким образом, кроме рассмотренных в предыдущем разделе вариантов применения автоклавных технологий, весьма перспективным направлением в переработке низкосортного сульфидного сырья является атмосферное выщелачивание, подробно изученное в работах [17–24].

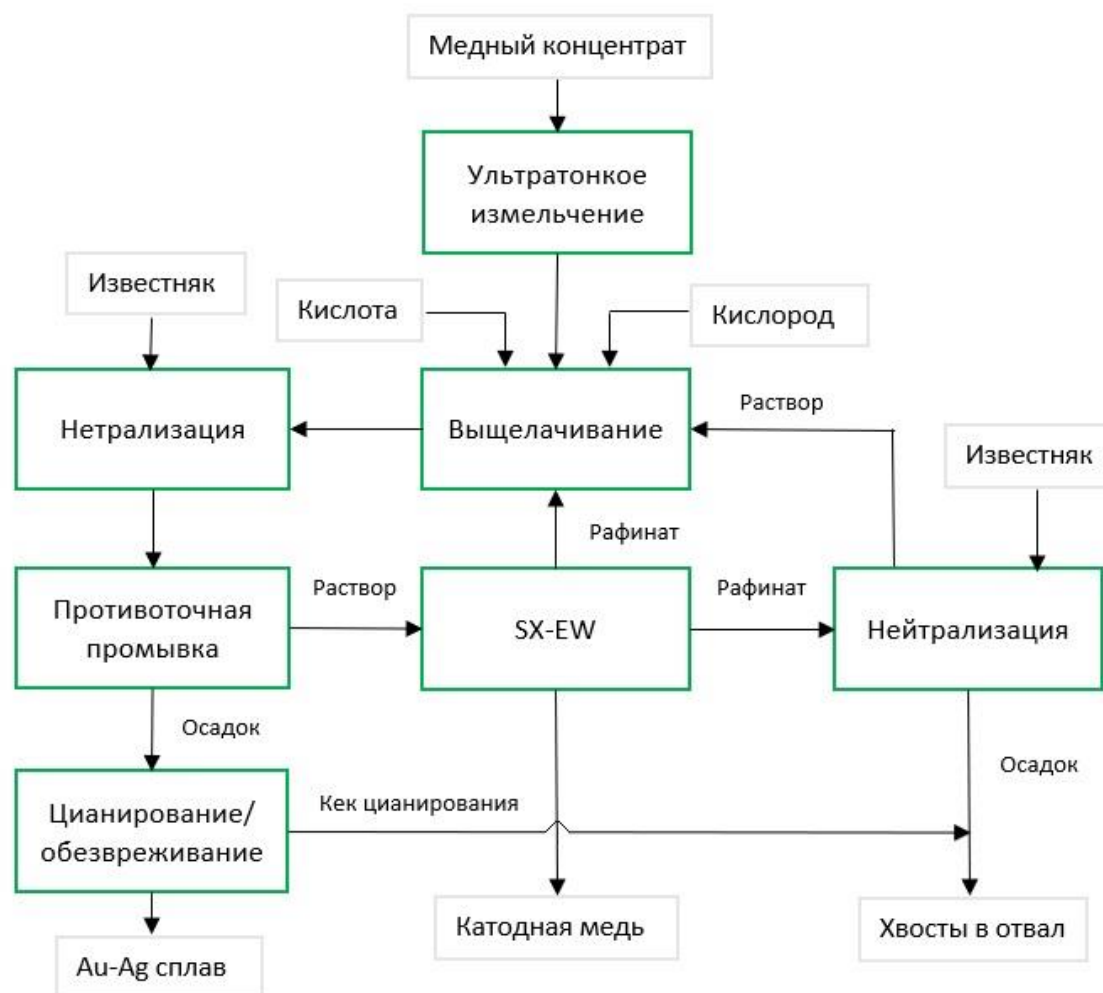


Рис. 7. Технологическая схема процесса Albion
Fig. 7. Albion process flow diagram

Помимо выбора метода и параметров выщелачивания, на процесс извлечения и его интенсификацию большое влияние оказывает предварительная обработка материала. К наиболее распространенным вариантам в первую очередь относятся термическая и механическая обработка.

В работе [17] был рассмотрен вариант технологии переработки, заключающийся в водном выщелачивании продукта, полученного посредством предварительного спекания исходного материала с NaOH, в данном случае – низкосортного медного концентрата со щелочью. Исследование указанной технологии также было представлено ранее в ряде работ, в том числе авторами статьи [18], которые, как и А. А. Шопперт [17], представили весьма хорошие конечные результаты, доказав эффективность применения метода.

Для понимания сущности процесса механоактивации целесообразно рассмотреть данную операцию более подробно, например, в отношении ее влияния на переработку медного сырья. Халькопирит – один из основных минералов меди. При этом его выщелачивание является затруднительным преимущественно из-за образования пассивирующего слоя на поверхности минерала. Для того чтобы избежать данной проблемы и тем самым повысить эффективность выщелачивания, прибегают к методу механоактивации, который обладает рядом преимуществ (более низкая требуемая температура процесса, более высокая площадь поверхности реакции и др.), что, как следствие, делает процесс выделения ценных компонентов более легким и менее дорогостоящим [19]. В работе [19] было изучено применение данного варианта для подготовки сульфидного медного сырья к выщелачиванию и его влияние на показатели процесса. Результаты опытов показали, что использование механоактивации положительно влияет на процесс выщелачивания, увеличивая степень извлечения ценных компонентов. Такой результат также согласуется с утверждением А. Н. Зеликмана о том, что разрушение кристаллической решетки минерала ведет к снижению энергии активации и росту скорости выщелачивания.

Применение механоактивации возможно не только в качестве метода предварительной обработки исходного сырья. Авторы работы [20] провели сравнение двух вариантов: первый представлял более привычную технологию выщелачивания с предварительной механоактивацией, а второй заключался в осуществлении параллельного (одновременного) проведения выщелачивания и механоактивации. В результате экспериментов вторая из рассмотренных технологий характеризовалась лучшими показателями процесса с более высокой степенью извлечения ценного компонента (в данном случае меди) в раствор выщелачивания.

Очевидно, что механическая активация является весьма эффективным способом, благодаря которому может быть достигнуто улучшение технологических показателей гидрометаллургического процесса за счет образования новой площади поверхности в комбинации с ростом разупорядоченности кристаллической решетки. Основными преимуществами механоактивации при этом являются снижение температуры процесса, увеличение скорости и степени растворимости, получение легкорастворимых соединений, что в совокупности приводит к уменьшению времени реакции и возможности использования менее сложных и дорогих реакторов [21, 22].

Еще одним из весьма перспективных и успешных способов переработки сульфидных материалов является относительно новая технология – Процесс Альбион; представляет собой комбинацию ультратонкого измельчения и окислительного выщелачивания при атмосферном давлении. В условиях нормального атмосферного давления невозможно выщелачивать большую часть сульфидных минералов, в данной же технологии с целью облегчения последующего процесса выщелачивания предварительно применяется стадия сверхтонкого измельчения. Сырьем служат концентраты, содержащие цветные или драгоценные металлы. Первая стадия процесса, сверхтонкое измельчение, приводит к высокой степени деформации решетки сульфидного минерала. Появление напряжений снижает энергию активации

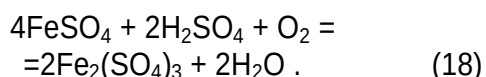
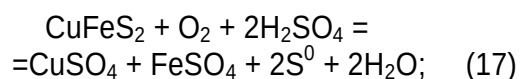
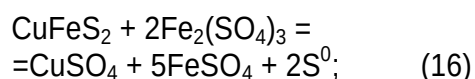
окисления сульфидов, вследствие чего становится возможным выщелачивание при атмосферных условиях. Скорость выщелачивания также становится больше из-за увеличения площади поверхности минералов.

После этапа измельчения концентрата пульпа поступает на этап выщелачивания, осуществляемый в емкостях с перемешиванием, при этом для окисления сульфидных минералов в пульпу выщелачивания вводится кислород со сверхзвуковой скоростью для повышения эффективности массопереноса и обеспечения эффективного окисления сульфидов [23].

Помимо выбора технологии переработки и ее аппаратного оформления, а также способа предварительной обработки исходных материалов, важным моментом является выбор той или иной химической системы, наиболее подходящей для извлечения ценных компонентов из интересующего сырья. Некоторые из возможных систем, пригодных для атмосферного выщелачивания халькопиритного сырья, рассмотрены более подробно далее.

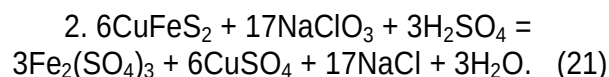
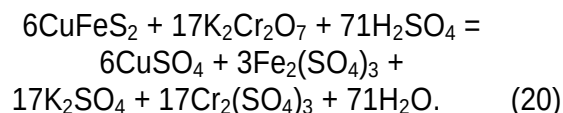
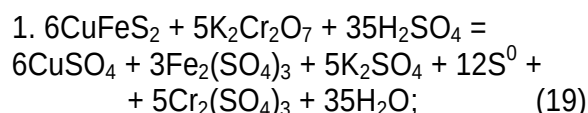
Наиболее часто используемым гидрометаллургическим процессом окисления халькопирита и извлечения меди из него является выщелачивание в системе «серная кислота–сульфат железа».

Следующие реакции считаются общими реакциями извлечения меди из халькопирита путем окисления или кислотного выщелачивания (H_2SO_4):

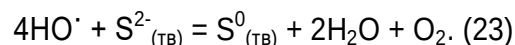
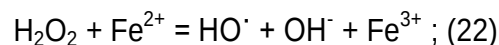


Система «серная кислота–альтернативные окислители». Окислительный потенциал иона трехвалентного железа относительно невелик, и поэтому с целью изучения способности извлекать медь из халькопирита был исследован ряд более

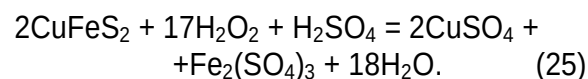
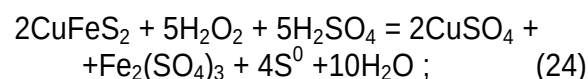
сильных окислителей: дихромат (1), хлорат (2), пероксид водорода – гидроксильный радикал (3), озон (4) и др.



3. Предполагаемый механизм окисления в разбавленных водных растворах перекиси водорода включает диссоциацию с образованием гидроксильного радикала (реакция (22)), который окисляет сульфидную часть минералов (реакция (23)) [24]:



П. А. Олубемби и Дж. Х. Потгейтер [25] установили, что выщелачивание халькопирита только серной кислотой протекало медленно, однако при добавлении в систему перекиси водорода извлечение меди было весьма быстрым, а сульфид при этом окислялся до элементарной серы и сульфата (реакции (24) и (25)):



4. Потенциальные преимущества использования озона в качестве окислителя халькопирита заключаются в том, что он не вводит дополнительных ионов в раствор и обладает высоким окислительным потенциалом. Поскольку элементарная сера не была обнаружена ни в одном эксперименте, а соотношение Fe:Cu было 1:1, Т. Хавлик и М. Скробиан [26] пришли к выводу, что общая реакция

будет иметь следующий вид:

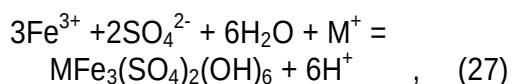


Также Карилло-Педроза и авторы [27] установили, что окисление озоном в целом представляет собой многообещающую «чистую» технологию переработки сульфидных руд.

Гибридные сульфатно-хлоридные системы.

1. $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--NaCl--O}_2$.

Преимущество использования серной кислоты и хлорида натрия для создания псевдохлоридного выщелачивающего агента состоит в том, что они являются более оптимальными по стоимости реагентами относительно хлорида железа или хлорида меди. Добавление хлорида к сульфатной системе радикально меняет состав раствора, поскольку ионы железа и меди могут образовывать комплексные частицы с ионами хлора, которые, в свою очередь, способствуют выщелачиванию. Окислителем в таких системах является кислород. Ионы двухвалентного железа, образующиеся при выщелачивании халькопирита, будут окисляться до ионов трехвалентного железа (реакции (17) и (18)), что избавляет от необходимости дополнительного их добавления в систему в начале процесса; впоследствии ионы Fe^{3+} будут способствовать общему извлечению меди. При тщательном выборе условий выщелачивания большая часть железа и некоторое количество сульфата могут быть осаждены в виде ярозита (реакция (27)):



где $\text{M} - \text{K}^+, \text{Na}^+, \text{NH}_4^+$ или H^+ .

2. $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{--NaCl}$.

По результатам исследований Дж. Е. Датризек [28] было установлено, что добавление хлорида иона к системе «сульфат железа–серная кислота» постепенно ускоряет выщелачивание халькопирита и значительно способствует извлечению меди. Кроме того, в некоторых засушливых регионах, где запасы пресной воды ограничены и

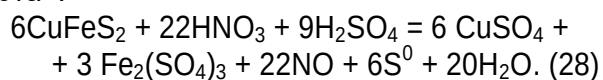
использование воды при переработке полезных ископаемых должно быть эффективным, пресная вода была заменена морской водой в нескольких технологических процессах, включая кучное выщелачивание медных руд.

Гибридные сульфатно-нитратные системы.

Азотная кислота одновременно является сильной кислотой и сильным окислителем. Ее потенциальное использование при переработке меди изучается в течение многих лет, но единственный процесс, который был использован в промышленных масштабах, – сернокислотное выщелачивание под давлением, катализируемое азотом NSC (от англ. nitrogen species catalyzed) [29]. Преимущество азотной кислоты в условиях умеренной температуры – отсутствие коррозии оборудования. Недостатки же заключаются в том, что промышленность имеет относительно небольшой опыт использования системы, а также в том, что нитраты в растворах для выщелачивания могут создавать проблемы при дальнейшем применении их в процессах жидкостной экстракции, поскольку азотные частицы способны разлагать экстрагенты.

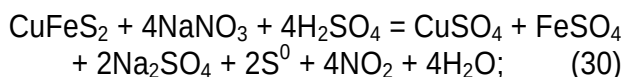
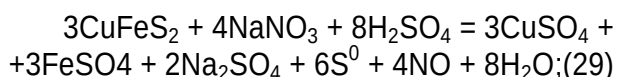
1. Система «серная кислота–азотная кислота».

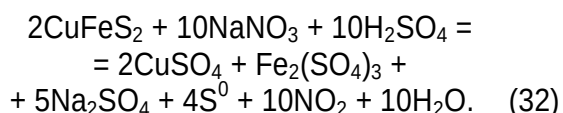
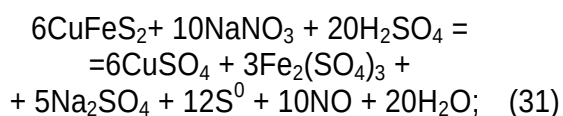
Реакция (28) представляет процесс взаимодействия компонентов в системе выщелачивания «сульфидная кислота–азотная кислота».



2. Система «серная кислота–нитрат натрия».

Авторы статей [30, 31] исследовали выщелачивание халькопирита в системе «серная кислота–нитрат натрия». Авторами было показано, что во время реакций халькопирита с нитратом натрия (реакции (29)–(32)) образуется элементарная сера, и что ее присутствие на поверхности частиц замедляет выщелачивание.





В целом важно отметить, что на показатели извлечения и скорость выделения полезных компонентов и, следовательно, на выбор использования той или иной гидрометаллургической технологии оказывает влияние ряд физико-химических свойств сырья (по отдельности или в совокупности), главные из которых: состав минералов; связь минералов в сырье; размер зерен (необходимость тонкого измельчения концентратов для получения разумной (с экономической точки зрения) скорости извлечения металлов при выщелачивании широко изложена и составляет ключевой параметр в таких процессах как Альбион [23] и процесс Mintek/Bactech [32, 33]); возможность образования аморфного силикагеля, увеличивающего вязкость продуктов выщелачивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере постепенного снижения качества используемых медных руд получаемые концентраты стали более сложными с точки зрения переработки. В этой связи вопрос кондиционирования низкосортного комплексного сырья на сегодняшний день является

крайне важным и актуальным.

С целью обеспечения положительных результатов и сохранения прибыльного бизнеса металлургическим предприятиям в ближайшее время необходимо будет перейти от стандартных способов переработки материалов, которые становятся все менее эффективными с экономической точки зрения, а также зачастую далеко неблагоприятными и с экологической стороны вопроса (в случае рассмотрения применения пирометаллургических методов), к изучению путей переработки современных комплексных материалов, представленных бедными забалансовыми рудами, хвостовыми отвалами и другими отходами производства для обеспечения и сохранения прибыльного бизнеса. Так, авторы статьи [34] об особенностях медных и медно-цинковых колчеданных руд, указывают на то, что хвосты обогащения (флотации) рассматриваемых руд содержат в себе значительное количество сульфидов меди и цинка, которые возможно извлечь посредством гидрометаллургии с целью повышения комплексности переработки сырья.

Одним из вариантов решения данной задачи является применение современных гидрометаллургических технологий обработки материалов. В их числе – методы автоклавного и атмосферного выщелачивания, исследования которых все более активно проводятся учеными и технологами, а результаты говорят о перспективности применения данных методов.

Список источников

1. Корнеев С. И. Международный обзор рынка цветных металлов // Цветные металлы. 2020. № 11. С. 4–7.
2. Artykova A. V., Melamud V. S., Boduen A. Ya., Bulaev A. G. Two-stage leaching of copper-zinc concentrate containing tennantite // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 548. P. 062042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062042>.
3. Mudd G. M., Jowitt S. M. Growing global copper resources, reserves and production: discovery is not the only control on supply // Economic Geology. 2018. Vol. 113. Iss. 6. P. 1235–1267. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4590>.
4. Flores G. A., Risopatron C., Pease J. Processing of complex materials in the copper industry: challenges and opportunities ahead // JOM. 2020. Vol. 72. 3447–3461. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04255-9>.
5. Бодуэн А. Я., Фокина С. Б., Петров Г. В., Андреев Ю. В. Аммиачно-автоклавная технология переработки низкосортных концентратов флотационного обогащения медистых песчанников // Обогащение руд. 2019. № 2. С. 33–38. <https://doi.org/10.17580/or.2019.02.06>.
6. Бодуэн А. Я., Иванов Б. С., Коновалов Г. В. Влияние повышения качества медных концентратов на эффективность их переработки // Записки Горного института. 2011. Т. 192. С. 46–48.
7. Зайцев П. В., Шнеерсон Я. М. Автоклавные процессы переработки медьсодержащего сырья // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 26–31. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.04>.
8. Sinisalo P., Lundström M. Refining approaches in the platinum group metal processing value chain – a review //

- Metals. 2018. Vol. 8. Iss. 4. P. 203. <https://doi.org/10.3390/met8040203>.
9. Wieszczycka K. Wastes generated by mineral extraction industries // Physical Sciences Reviews. 2018. Vol. 3. Iss. 6. <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0026>.
10. Weidenbach M., Dunn G., Teo Yong Yong. Removal of impurities from copper sulfide mineral concentrates // ALTA 7th Nickel-Cobalt-Copper Conference (Perth, 21–28 May 2016). Perth, 2016.
11. Lundström M., Liipo J., Karonen J., Aromaa J. Dissolution of six sulfide concentrates in the Hydrocopper environment // The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Base Metals Conference. 2009. P. 127–138. [Электронный ресурс]. URL: http://www.saimm.co.za/Conferences/BM2009/127-138_Lundstrom.pdf (04.03.2021).
12. Sammut D., Welham N. J. The Intec copper process: a detailed environmental analysis // Green Processing Conference (Cairns, 29–31 May 2002). Cairns, 2002. P. 115–124.
13. Hourn M., Turner D. W. Commercialisation of Albion process // ALTA Nickel-Cobalt-Copper, Uranium & Gold Conference (Perth, June 2012). Perth, 2012.
14. Senchenko A. Y., Aksenov A. V., Vasiliev A. A., Seredkin Y. G. Technology for processing of refractory gold-containing concentrates based on ultrafine grinding and atmospheric oxidation // 28th International Mineral Processing Congress Proceedings (Quebec, 11–15 September 2016). Quebec, 2016.
15. Senchenko A. Y., Aksenov A. V., Vasiliev A. A., Seredkin Y. G. Albion process capabilities for processing of feed materials different in their composition // 29th International Mineral Processing Congress (Moscow, 24–26 September 2018). M., 2018.
16. Senchenko A. Y., Seredkin Y. G., Aksenov A. V., Vasiliev A. A. Processing of a refractory concentrate with high gold content in sulphides and rock-forming minerals // 30th International Mineral Processing Congress (Cape Town, 18–22 October 2020). Cape Town, 2020. P. 2439–2458.
17. Shoppert A. A., Karimova L. M., Zakharyan D. V. Novel method for comprehensive processing of low-grade copper concentrate // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 856–862. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.856>.
18. Li Dong, Guo Xueyi, Xu Zhipeng, Xu Runze, Feng Qiming. Metal values separation from residue generated in alkali fusion-leaching of copper anode slime // Hydrometallurgy. 2016. Vol. 165. Part 2. P. 290–294. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.021>.
19. Vafaeian S., Ahmadian M., Rezaei B. Sulphuric acid leaching of mechanically activated copper sulphidic concentrate // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24. Iss. 15. P. 1713–1716. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.010>.
20. Mohammadabad F. K., Hejazi S., Khaki J. V., Babakhani A. Mechanochemical leaching of chalcopryrite concentrate by sulfuric acid // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2016. Vol. 23. P. 380–388. <https://doi.org/10.1007/s12613-016-1247-7>.
21. Mussapyrova L., Nadirov R., Baláž P., Rajňák M., Bureš R., Baláž M. Selective room-temperature leaching of copper from mechanically activated copper smelter slag // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 12. P. 2011–2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.090>.
22. Bai Yunlong, Wang Wei, Zhao Shanrong, lu Diankun, Xie Feng, Dreisinger D. Effect of mechanical activation on leaching behavior and mechanism of chalcopryrite // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021. Vol. 43. Iss. 4. P. 440–452. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1906239>.
23. Anderson C. G., Fayram T., Twidwell L. NSC Hydrometallurgical pressure oxidation of combined copper and molybdenum concentrates // Journal of Powder Metallurgy and Mining. 2013. Vol. 2. Iss. 3. <https://doi.org/10.4172/2168-9806.1000115>.
24. Sokić M., Marković B., Stanković S., Kamberović Ž., Štrbac N., Manojlović V., et al. Kinetics of chalcopryrite leaching by hydrogen peroxide in sulfuric acid // Metals. 2019. Vol. 9. Iss. 11. P. 1173. <https://doi.org/10.3390/met9111173>.
25. Olubambi P. A., Potgieter J. H. Investigations on the mechanisms of sulfuric acid leaching of chalcopryrite in the presence of hydrogen peroxide // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2009. Vol. 30. 327–345. <https://doi.org/10.1080/08827500902958191>.
26. Havlik T., Skrobjan M. Acid leaching of chalcopryrite in the presence of ozone // Canadian Metallurgical Quarterly. 1990. Vol. 29. Iss. 2. P. 133–139. <https://doi.org/10.1179/cm.1990.29.2.133>.
27. Wang Jingxiu, Faraji F., Ghahreman A. Evaluation of ozone as an efficient and sustainable reagent for chalcopryrite leaching: process optimization and oxidative mechanism // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2021. Vol. 104. P. 333–344. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.08.036>.
28. Dutrizac J. E. The dissolution of chalcopryrite in ferric sulfate and ferric chloride media // Metallurgical Transactions B. 1981. Vol. 12. P. 371–378. <https://doi.org/10.1007/BF02654471>.
29. Anderson C. G. Industrial NSC hydrometallurgical precious metals recycle // SOJ Materials Science & Engineering. 2013. Vol. 1. Iss. 1. <https://doi.org/10.15226/sojmse.2013.00105>.
30. Neira A., Pizarro D., Quezada V., Velásquez-Yévenes L. Pretreatment of copper sulphide ores prior to heap leaching: a review // Metals. 2021. Vol. 11. Iss. 7. P. 1067. <https://doi.org/10.3390/met11071067>.
31. Sokić M., Stojanović J., Marković B., Bugarčić M., Štrbac N., Kamberović Z., et al. Effects of structural and textural grain characteristics on leaching of sulphide minerals from a polymetallic concentrate by sodium nitrate and sulphuric acid solution // Hemijska Industrija. 2017. Vol. 71. Iss. 6. P. 461–469. <https://doi.org/10.2298/HEMIND161130006S>.
32. Gericke M., Neale J. W., Van Staden P. A Mintek perspective of the past 25 years in minerals bioleaching // Journal South African Institute of Mining and Metallurgy. 2009. Vol. 109. Iss. 10. P. 567–585.
33. Van Staden P. J. The Mintek/Bactech copper bioleach

process // ALTA Copper Sulphides Symposium (Brisbane, 19–21 October 1998). Brisbane, 1998.

34. Ягудин Р. А., Ягудина Ю. Р., Емельяненко Е. А.

Технологические решения при переработке медноколчеданных руд // Горный журнал. 2014. № 7. С. 30–33.

References

1. Korneev S. I. International review of market of non-ferrous metals. *Tsvetnye metall.* 2020;11:4-7. (In Russ.).
2. Artykova A. V., Melamud V. S., Boduen A. Ya., Bulaev A. G. Two-stage leaching of copper-zinc concentrate containing tennantite. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;548:062042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062042>.
3. Mudd G. M., Jowitt S. M. Growing global copper resources, reserves and production: discovery is not the only control on supply. *Economic Geology*. 2018;113(6):1235-1267. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4590>.
4. Flores G. A., Risopatron C., Pease J. Processing of complex materials in the copper industry: challenges and opportunities ahead. *JOM*. 2020;72:3447-3461. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04255-9>.
5. Boduen A. Ya., Fokina S. B., Petrov G. V., Andreev Yu. V. Ammonia autoclave technology for the processing of low-grade concentrates generated in flotation concentration of cupriferous sandstones. *Obogashchenie rud*. 2019;2:33-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2019.02.06>.
6. Boduen A. J., Ivanov B. S., Konovalov G. V. Influence of improvement of quality of copper concentrates on efficiency of their processing. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2011;192:46-48. (In Russ.).
7. Zaitsev P. V., Shneerson Ya. M. Autoclave processing of copper-bearing materials. *Tsvetnye metall.* 2016;1:26-31. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.04>.
8. Sinisalo P., Lundström M. Refining approaches in the platinum group metal processing value chain – a review. *Metals*. 2018;8(4):203. <https://doi.org/10.3390/met8040203>.
9. Wieszczucka K. Wastes generated by mineral extraction industries. *Physical Sciences Reviews*. 2018;3(6). <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0026>.
10. Weidenbach M., Dunn G., Teo Yong Yong. Removal of impurities from copper sulfide mineral concentrates. In: *ALTA 7th Nickel-Cobalt-Copper Conference*. 21–28 May 2016, Perth. Perth; 2016.
11. Lundström M., Liipo J., Karonen J., Aromaa J. Dissolution of six sulfide concentrates in the Hydrocopper environment. In: *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Base Metals Conference*. 2009;127-138. Available from: http://www.saimm.co.za/Conferences/BM2009/127-138_Lundstrom.pdf [Accessed 4th March 2021].
12. Sammut D., Welham N. J. The Intec copper process: a detailed environmental analysis. In: *Green Processing Conference*. 29–31 May 2002, Cairns. Cairns; 2002, p. 115-124.
13. Hourn M., Turner D. W. Commercialisation of Albion process. In: *ALTA Nickel-Cobalt-Copper, Uranium & Gold Conference*. June 2012, Perth. Perth; 2012.
14. Senchenko A. Y., Aksenov A. V., Vasiliev A. A., Seredkin Y. G. Technology for processing of refractory gold-containing concentrates based on ultrafine grinding and atmospheric oxidation. In: *28th International Mineral Processing Congress Proceedings*. 11–15 September 2016, Quebec. Quebec; 2016.
15. Senchenko A. Y., Aksenov A. V., Vasiliev A. A., Seredkin Y. G. Albion process capabilities for processing of feed materials different in their composition. In: *29th International Mineral Processing Congress*. 24–26 September 2018, Moscow. M.; 2018.
16. Senchenko A. Y., Seredkin Y. G., Aksenov A. V., Vasiliev A. A. Processing of a refractory concentrate with high gold content in sulphides and rock-forming minerals. In: *30th International Mineral Processing Congress*. 18–22 October 2020, Cape Town. Cape Town; 2020, p. 2439-2458.
17. Shoppert A. A., Karimova L. M., Zakharyan D. V. Novel method for comprehensive processing of low-grade copper concentrate. *Solid State Phenomena*. 2018;284:856-862. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.856>.
18. Li Dong, Guo Xueyi, Xu Zhipeng, Xu Runze, Feng Qiming. Metal values separation from residue generated in alkali fusion-leaching of copper anode slime. *Hydrometallurgy*. 2016;165(2):290-294. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.021>.
19. Vafaeian S., Ahmadian M., Rezaei B. Sulphuric acid leaching of mechanically activated copper sulphidic concentrate. *Minerals Engineering*. 2011;24(15):1713-1716. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.010>.
20. Mohammadabad F. K., Hejazi S., Khaki J. V., Babakhani A. Mechanochemical leaching of chalcopyrite concentrate by sulfuric acid. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2016;23:380-388. <https://doi.org/10.1007/s12613-016-1247-7>.
21. Mussapyrova L., Nadirov R., Baláž P., Rajňák M., Bureš R., Baláž M. Selective room-temperature leaching of copper from mechanically activated copper smelter slag. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;12:2011-2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.090>.
22. Bai Yunlong, Wang Wei, Zhao Shanrong, Lu Diankun, Xie Feng, Dreisinger D. Effect of mechanical activation on leaching behavior and mechanism of chalcopyrite. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021;43(4):440-452. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1906239>.
23. Anderson C. G., Fayram T., Twidwell L. NSC Hydro-metallurgical pressure oxidation of combined copper and molybdenum concentrates. *Journal of Powder Metallurgy and Mining*. 2013;2(3). <https://doi.org/10.4172/2168-9806.1000115>.
24. Sokić M., Marković B., Stanković S., Kamberović Ž., Štrbac N., Manojlović V., et al. Kinetics of chalcopyrite leaching by hydrogen peroxide in sulfuric acid. *Metals*. 2019;9(11):1173. <https://doi.org/10.3390/met9111173>.
25. Olubambi P. A., Potgieter J. H. Investigations on the mechanisms of sulfuric acid leaching of chalcopyrite in the

presence of hydrogen peroxide. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2009;30:327-345. <https://doi.org/10.1080/08827500902958191>.

26. Havlik T., Skrobjan M. Acid leaching of chalcopirite in the presence of ozone. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1990;29(2):133-139.

<https://doi.org/10.1179/cmqr.1990.29.2.133>.

27. Wang Jingxiu, Faraji F., Ghahreman A. Evaluation of ozone as an efficient and sustainable reagent for chalcopirite leaching: process optimization and oxidative mechanism. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021;104:333-344.

<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.08.036>.

28. Dutrizac J. E. The dissolution of chalcopirite in ferric sulfate and ferric chloride media. *Metallurgical Transactions B*. 1981;12:371-378. <https://doi.org/10.1007/BF02654471>.

29. Anderson C. G. Industrial NSC hydrometallurgical precious metals recycle. *SOJ Materials Science & Engineering*. 2013;1(1). <https://doi.org/10.15226/sojmse.2013.00105>.

30. Neira A., Pizarro D., Quezada V., Velásquez-Yévenes L. Pretreatment of copper sulphide ores prior to heap leaching: a review. *Metals*. 2021;11(7):1067. <https://doi.org/10.3390/met11071067>.

31. Sokić M., Stojanović J., Marković B., Bugarčić M., Štrbac N., Kamberović Z., et al. Effects of structural and textural grain characteristics on leaching of sulphide minerals from a polymetallic concentrate by sodium nitrate and sulphuric acid solution. *Hemijaska Industrija*. 2017;71(6):461-469.

<https://doi.org/10.2298/HEMIND161130006S>.

32. Gericke M., Neale J. W., Van Staden P. A Mintek perspective of the past 25 years in minerals bioleaching. *Journal South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009;109(10):567-585.

33. Van Staden P. J. The Mintek/Bactech copper bioleach process. In: *ALTA Copper Sulphides Symposium*. 19–21 October 1998, Brisbane. Brisbane; 1998.

34. Yagudin R. A., Yagudina Yu. R., Emelianenko E. A. Process solution in pyrite copper ore processing. *Gornyj zhurnal*. 2014;7:30-33. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васильева Анна Андреевна,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Бодуэн Анна Ярославовна,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Васильев Роман Евгеньевич,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,
Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.04.2022; одобрена после рецензирования 12.05.2022; принята к публикации 08.06.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna A. Vasilieva,

Postgraduate Student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Anna Ya. Boduen,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Metallurgy Department,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Roman E. Vasiliev,

Postgraduate Student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 12.04.2022; approved after reviewing 12.05.2022; accepted for publication 08.06.2022.



Научная статья

УДК 661.849:661.862:66.048.1–982

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-336-347>

Фазовые равновесия в системе Hg–Al при вакуумной дистилляции

Алексей Анатольевич Королев¹, Владимир Александрович Шунин^{2✉},
Константин Леонидович Тимофеев³, Геннадий Иванович Мальцев⁴,
Роман Сергеевич Воинков⁵

¹⁻⁵ Акционерное общество «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма, Россия

³ Технический университет Уральской горно-металлургической компании, г. Верхняя Пышма, Россия

¹ A.Korolev@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0338-9774>

² V.Shunin@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5265-1006>

³ K.Timofeev@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9525-6476>

⁴ mgi@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

⁵ R.Voinkov@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6697-1596>

Резюме. Целью работы является расчет равновесных состояний «газ–жидкость», включая зависимости состава фаз от температуры (T -х) и давления (P -х) для Hg–Al сплава при вакуумной перегонке. Объектами исследования являлись Hg–Al сплавы состава, моль %: 20–80 Hg; 80–20 Al, образование которых возможно в процессе переработки медеэлектролитного шлама при получении товарного концентрата селена. Для расчета коэффициентов активности компонентов Hg–Al сплава использована упрощенная версия объемной модели молекулярного взаимодействия типа simple molecular interaction volume model. Для предварительного выбора температуры и давления системы, оценки эффективности разделения компонентов используют фазовые диаграммы температуры (T -х) и давления (P -х). Новизна выполненных исследований обусловлена расчетом коэффициентов активности с использованием выбранной упрощенной версии модели. В интервале температур 823–1073 К рассчитаны давления насыщенного пара для Hg (p_{Hg}^*) и Al (p_{Al}^*). Высокие значения соотношения $p_{\text{Hg}}^* / p_{\text{Al}}^* \geq 3 \cdot 10^{10}$ и коэффициента разделения $\log \beta_{\text{Hg}} \geq 10$ создают теоретические предпосылки для селективного выделения этих металлов вакуумной дистилляцией, когда ртуть концентрируется в газовой фазе ($\beta_{\text{Hg}} > 1$), а алюминий – в жидкой. Для границы раздела фаз «жидкость–газ» Hg–Al сплава определены значения изменения энергии Гиббса, энтальпии и энтропии: $-\Delta G_m^E = 1\text{--}3$ кДж/моль; $-\Delta H_m^E = 1\text{--}3$ кДж/моль; $\pm \Delta S_m^E = 0,03\text{--}0,17$ Дж/моль К. Практическая значимость состоит в сокращении количества установочных опытов при переработке Hg–Al композиций для оптимизации значений температуры и давления процесса вакуумной дистилляции.

Ключевые слова: равновесная фазовая диаграмма, вакуумная дистилляция, молекулярная объемная модель взаимодействия, ртуть, алюминий, энергия Гиббса

Для цитирования: Королев А. А., Шунин В. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С. Фазовые равновесия в системе Hg–Al при вакуумной дистилляции // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 336–347. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-336-347>.

METALLURGY

Original article

Phase equilibria in Hg–Al system during vacuum distillation

Aleksey A. Korolev¹, Vladimir A. Shunin^{2✉}, Konstantin L. Timofeev³,
Gennady I. Maltsev⁴, Roman S. Voinkov⁵

¹⁻⁵ JSC «Uralelectromed», Verkhnyaya Pyshma, Russia

³ Technical University of the Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

¹ A.Korolev@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0338-9774>

² V.Shunin@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5265-1006>

© Королев А. А., Шунин В. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С., 2022

³K. Timofeev@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9525-6476>

⁴mgi@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

⁵R. Voinkov@elem.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6697-1596>

Abstract. In this work, gas-liquid equilibrium states are calculated, including phase composition dependences on temperature (T - x) and pressure (P - x) for the Hg–Al alloy during vacuum distillation. The objects of research comprised Hg–Al alloys having the following composition, mole %: 20–80 Hg; 80–20 Al, whose formation may occur during the processing of copper anode slime upon producing commercial selenium concentrate. A simplified molecular interaction volume model was used to calculate the activity coefficients of the components in the Hg–Al alloy. Phase diagrams of temperature (T - x) and pressure (P - x) are used for the preliminary selection of temperature and pressure in the system, as well as for the evaluation of the separation efficiency of components. The novelty of the research stems from calculating activity coefficients using the selected simplified model. Saturated vapour pressures for Hg (p_{Hg}^*) and Al (p_{Al}^*) were calculated in the temperature range of 823–1073 K. The high values of the $p_{\text{Hg}}^*/p_{\text{Al}}^* \geq 3 \cdot 10^{10}$ ratio and separation coefficient $\log \beta_{\text{Hg}} \geq 10$ provide theoretical premises for selective extraction of these metals by vacuum distillation, where mercury is concentrated in the gas phase ($\beta_{\text{Hg}} > 1$) and aluminium in the liquid phase. The values of excess Gibb's energy, enthalpy and entropy changes for the liquid-gas interface of Hg–Al alloy were determined: $-\Delta G_m^E = 1\text{--}3$ kJ/mol; $-\Delta H_m^E = 1\text{--}3$ kJ/mol; $\pm \Delta S_m^E = 0.03\text{--}0.17$ J/mol·K. The practical significance of the research lies in minimising the number of initial experiments during the processing of Hg–Al compositions for optimising the temperature and pressure in the vacuum distillation process.

Keywords: equilibrium phase diagram, vacuum distillation, molecular volume interaction model, mercury, aluminum, Gibbs energy

For citation: Korolev A. A., Shunin V. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I., Voinkov R. S. Phase equilibria in Hg–Al system during vacuum distillation. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):336–347. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-336-347>.

ВВЕДЕНИЕ

Для переработки металлических сплавов с целью разделения компонентов применяют вакуумную дистилляцию – высокопроизводительный и экологически безопасный пирометаллургический процесс, использующий разницу в давлении при одинаковой температуре насыщенных паров разделяемых металлов (P^*) между газовой и жидкой фазами, количественно характеризующихся коэффициентами разделения (β) [1–4]. Расчет состава продуктов возгонки и степень разделения компонентов сплава осуществляют при помощи равновесных фазовых диаграмм VLE (от англ. vapor liquid equilibrium) температура–состав « T – x » и давление–состав « P – x » [5–8]. Для определения значений β нужно вычислить коэффициенты активности компонентов (γ_i , γ_j), изменяющиеся в зависимости от температуры и состава сплава с помощью объемной модели молекулярного взаимодействия MIVM (от англ. molecular interaction volume model). В расчете задействованы координационные числа (Z), молярные объемы (V_m), потенциальные энергии парного взаимодействия (B) компонентов сплава. Диаграммы VLE позволяют прогнозировать значения температуры и давления для заданной степени разделения компонентов исходного

материала и составов образующихся газовой и жидкой фаз.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс расчета MIVM является сложным, например, расчет первых координационных чисел Z_i и молекулярного объема V_{mi} компонентов сплавов, поэтому был использован метод, содержащий меньшее количество параметров системы, а именно – упрощенный MIVM или SMIVM (от англ. simple molecular interaction volume model), с помощью которого были рассчитаны активность компонентов Hg–Al сплавов и фазовые диаграммы VLE. Прогнозируемые оптимальные параметры разделения компонентов сплавов можно получать из VLE фазовых диаграмм [9–12].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись Hg–Al сплавы состава, % мол.: 20–80 Hg; 80–20 Al, образование которых возможно в процессе переработки медеэлектролитного шлама при получении товарного концентрата селена. Лабораторные эксперименты по дистилляции компонентов сплавов проводились в вертикальной вакуумной печи. Степень вакуума в печи на время эксперимента составляла 1,33–133 Па, температура была 800–1100 К.

Состав образцов возгонов и остатков определяли из предварительно полученных растворов атомно-абсорбционным методом на установке GBC 933AB Plus. В экспериментах использовали образцы сплавов цилиндрической формы. Сначала образец помещали в цилиндрический тигель ($h = 40$ мм, $d = 40$ мм) из тонкодисперсных зерен графита высокой плотности. Затем тигель переносили в вакуумную печь и нагревали, контролируя температуру. Для предотвращения испарения металлов на стадии плавления образца процесс осуществляли в атмосфере аргона при нормальном давлении. Разрежение в рабочей камере производили паромасляным диффузионным насосом при достижении необходимой температуры – этот момент считали началом вакуумной перегонки ($\tau = 0$). Затем поддерживали в камере давление и температуру в течение заданного времени эксперимента. По окончании опыта выключали обогреватель, аргон заполнял камеру, давление в которой нормализовалось. Металлы, перешедшие в возгоны, конденсировались на холодной пластине, подключенной к циркуляционной водной системе. При температуре 40°C возгоны и остаток вынимали из печи и взвешивали.

Упрощенная объемная модель молекулярного взаимодействия SMIVM использована для расчета коэффициентов активности компонентов исходных сплавов [13–16]. В решеточной теории растворов координационное число Z имеет одно и то же постоянное значение (6)–(12). Установлено, что разница между координационными числами компонентов незначительно влияет на точность прогнозирования MIVM. Однако лучшие результаты получены, когда $Z \approx 10$. Кроме того, молярный объем i -компонента в жидком состоянии V_{mi} может быть заменен его молярным объемом в твердом состоянии V_i , поскольку разность плотностей для вещества между жидким и твердым состоянием небольшая. Уравнения для определения коэффициентов активности компонентов спла-

вов (y_i , y_j) приобретают вид [17–20]:

$$\ln y_i = 1 + \ln \left(\frac{V_i}{x_i V_i + x_j V_j B_{ji}} \right) - \left(\frac{x_i V_i}{x_i V_i + x_j V_j B_{ji}} + \frac{x_j V_j B_{ij}}{x_j V_j + x_i V_i B_{ij}} \right) - 5x_j^2 \left(\frac{B_{ji}^2 \ln B_{ji}}{(x_i + x_j B_{ji})^2} + \frac{B_{ij}^2 \ln B_{ij}}{(x_j + x_i B_{ij})^2} \right); \quad (1)$$

$$\ln y_j = 1 + \ln \left(\frac{V_j}{x_j V_j + x_i V_i B_{ij}} \right) - \left(\frac{x_j V_j}{x_j V_j + x_i V_i B_{ij}} + \frac{x_i V_i B_{ji}}{x_i V_i + x_j V_j B_{ji}} \right) - 5x_i^2 \left(\frac{B_{ij}^2 \ln B_{ij}}{(x_j + x_i B_{ij})^2} + \frac{B_{ji}^2 \ln B_{ji}}{(x_i + x_j B_{ji})^2} \right). \quad (2)$$

Давление насыщенных паров чистых компонентов, необходимое для расчета VLE, может быть получено следующим образом⁶ [21–25]:

$$\lg p^{\text{sat}} = AT^{-1} + B \lg T + CT + D, \quad (3)$$

где p^{sat} – давление насыщенных паров чистого компонента в Па; T – абсолютное значение температуры, К; коэффициенты A – D являются константами испарения.

Для проверки адекватности расчетных значений содержания компонентов сплавов в жидкой и газовой фазах сравнили их с экспериментальными данными. Для этого были вычислены показания среднего относительного отклонения (S_i , %) и среднего квадратичного отклонения (S_i^* , мол. доли):

$$S_i = \pm \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x(y)_{i,\text{exp}} - x(y)_{i,\text{cal}}}{x(y)_{i,\text{exp}}} \right| \cdot 100 \% ; \quad (4)$$

$$S_i^* = \pm \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x(y)_{i,\text{exp}} - x(y)_{i,\text{cal}}]^2 \right]^{0.5}, \quad (5)$$

где $x(y)_{i,\text{exp}}$ и $x(y)_{i,\text{cal}}$ – экспериментальные и расчетные значения содержания мольных долей компонента i в жидкой (x) и газовой (y) фазах, соответственно; n – количество экспериментальных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные характеристики Hg–Al сплава

⁶Лидин Р. А., Молочко В. А., Андреева Л. Л. Химические свойства неорганических веществ: учеб. пособ. 3-е изд., испр. М.: Изд-во «Аргамак-Медиа», 2017. 480 с.

приведены в табл. 1.

Ртуть легко возгоняется (высокие значения $p_{\text{Hg}}^* = (1,42 - 10,46) \cdot 10^6$ Па в отличие от алюминия (низкие значения $p_{\text{Al}}^* = 1,33 \cdot 10^{-8} - 3,54 \cdot 10^{-4}$ Па, который концентрируется в жидкой фазе, что позволяет достаточно полно их разделить вакуумной дистилляцией (табл. 2). Возможность отделения Hg от Al из их сплава вакуумной дистилляцией характеризуется коэффициентом разделения (β), для расчета которого используют коэффициенты активности (табл. 3, 4).

Значения $\beta_{\text{Hg}} > 1$, поскольку содержание

Hg в газовой фазе больше, чем в жидкой ($y_{\text{Hg}} \gg x_{\text{Hg}}$). Ртуть концентрируется в газовой фазе, алюминий – в кубовом остатке ($x_{\text{Al}} \gg y_{\text{Al}}$), что разделяет исходный сплав Hg–Al на ртуть и алюминий.

Коэффициент разделения ртути и алюминия возрастает ($\log \beta_{\text{Hg}} = 10,024 - 14,781$) по мере снижения температуры процесса (1073–823 K) и доли алюминия ($x_{\text{Al}} = 0,9 - 0,1$) в составе бинарного сплава (рис. 1).

Данные по количественному составу продуктов дистилляции представлены на рис. 2 и в табл. 4, 5.

Таблица 1. Значения параметров γ_i^∞ , γ_j^∞ , B_{ij} , B_{ji} , Z_i , Z_j , p_i^* , p_j^* , $V_{m(i,j)}$ сплава Hg–Al

Table 1. Values of γ_i^∞ , γ_j^∞ , B_{ij} , B_{ji} , Z_i , Z_j , p_i^* , p_j^* , $V_{m(i,j)}$ parameters of the Hg–Al alloy

<i>i–j</i> сплав	<i>T, K</i>	$\gamma_{\text{Hg}}^\infty / \gamma_{\text{Al}}^\infty$		<i>B</i>		<i>Z</i>	
				$B_{\text{Hg–Al}}$	$B_{\text{Al–Hg}}$	Hg	Al
Hg/Al	710	0,415/0,487		1,0263	1,3117	10	10
Металл	–A	–B	C	D	$V_m = f(T)$, см ³ /моль		
Hg	3066	–	–	9,877	$5,3[1 + 1,9 \cdot 10^{-4}(T - 752,9)]$		
Al	15630	–	–	11,115	$11,3[1 + 1,5 \cdot 10^{-4}(T - 933,52)]$		

Таблица 2. Рассчитанные давления паров Hg и Al

Table 2. Calculated pressures of Hg and Al vapors

<i>T, K</i>	p_{Hg}^* , Па	p_{Al}^* , Па	$p_{\text{Se}}^* / p_{\text{Al}}^*$
823	$1,418 \cdot 10^6$	$1,33 \cdot 10^{-8}$	$1,066 \cdot 10^{14}$
923	$3,591 \cdot 10^6$	$1,51 \cdot 10^{-6}$	$2,378 \cdot 10^{12}$
1023	$7,585 \cdot 10^7$	$6,86 \cdot 10^{-5}$	$1,106 \cdot 10^{12}$
1073	$1,046 \cdot 10^7$	$3,54 \cdot 10^{-4}$	$2,959 \cdot 10^{10}$

Таблица 3. Рассчитанные значения коэффициентов активности Hg и Al в расплаве

Table 3. Calculated values of Hg and Al activity coefficients in the melt

<i>T, K</i>	γ	x_{Hg}				
		0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	$\gamma_{\text{Hg}} / \gamma_{\text{Al}}$	0,258/0,982	0,426/0,847	0,632/0,619	0,839/0,370	0,979/0,173
923		0,298/0,984	0,469/0,863	0,668/0,655	0,858/0,420	0,982/0,220
1023		0,335/0,986	0,507/0,876	0,698/0,685	0,873/0,463	0,984/0,264
1073		0,352/0,986	0,523/0,881	0,711/0,698	0,880/0,482	0,985/0,284

Таблица 4. Рассчитанные значения коэффициента разделения Hg и Al ($\lg \beta_{\text{Hg}}$)

Table 4. Calculated values of the Hg and Al separation coefficient ($\lg \beta_{\text{Hg}}$)

<i>T, K</i>	x_{Hg}	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	$\lg \beta_{\text{Hg}}$	13,448	13,73	14,037	14,384	14,781
	$\lg y_{\text{Al}}$	-12,493	-13,362	-14,037	-14,752	-15,735
923	$\lg \beta_{\text{Hg}}$	11,716	12,109	12,383	12,684	13,024
	$\lg y_{\text{Al}}$	-10,761	-11,741	-12,383	-13,052	-13,978
1023	$\lg \beta_{\text{Hg}}$	10,575	10,806	11,052	11,319	11,615
	$\lg y_{\text{Al}}$	-9,62	-10,438	-11,052	-11,687	-12,569
1073	$\lg \beta_{\text{Hg}}$	10,024	10,245	10,479	10,733	11,011
	$\lg y_{\text{Al}}$	-9,07	-9,877	-10,479	-11,101	-11,966

Таблица 5. Рассчитанные значения $\lg y_{\text{Al}}$ сплава Hg–Al
Table 5. Calculated values $\lg y_{\text{Al}}$ of the Hg–Al alloy

T, K	x_{Hg}	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
823	$\gamma_{\text{Hg}}/\gamma_{\text{Al}}$	0,199/1,0	0,212/0,998	0,224/0,996	0,238/0,991	0,251/0,986
	$\lg y_{\text{Al}}$	-11,331	-11,846	-12,101	-12,285	-12,429
923	$\gamma_{\text{Hg}}/\gamma_{\text{Al}}$	0,235/1,0	0,249/0,999	0,262/0,996	0,276/0,992	0,208/0,987
	$\lg y_{\text{Al}}$	-9,75	-10,261	-10,515	-10,695	-10,693
1023	$\gamma_{\text{Hg}}/\gamma_{\text{Al}}$	0,269/1,0	0,283/0,999	0,297/0,996	0,312/0,993	0,327/0,988
	$\lg y_{\text{Al}}$	-8,478	-8,986	-9,239	-9,417	-9,559
1073	$\gamma_{\text{Hg}}/\gamma_{\text{Al}}$	0,285/1,0	0,299/0,999	0,314/0,997	0,329/0,993	0,344/0,989
	$\lg y_{\text{Al}}$	-7,93	-8,438	-8,691	-8,868	-9,008

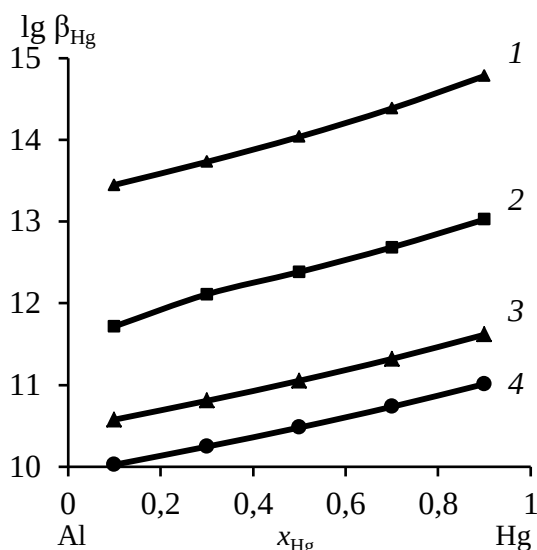


Рис. 1. Коэффициент разделения ртути при вакуумной дистилляции Hg–Al сплава при температуре, K: 823 (1); 923 (2); 1023 (3); 1073 (4)
Fig. 1. Mercury separation coefficient under vacuum distillation of the Hg–Al alloy at temperature, K: 823 (1); 923 (2); 1023 (3); 1073 (4)

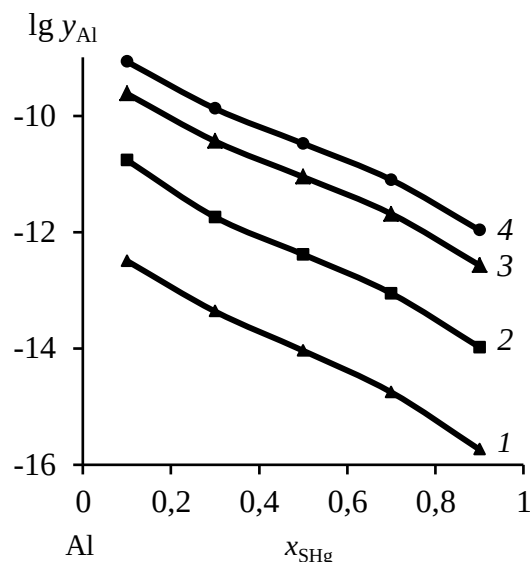


Рис. 2. Содержание Al в возгонах при температуре, K: 823 (1); 923 (2); 1023 (3); 1073 (4)
Fig. 2. Al content in fumes at temperature, K: 823 (1); 923 (2); 1023 (3); 1073 (4)

Ртуть можно отделить от алюминия возгонкой при температуре $\leq 550^\circ\text{C}$. Исходя из состава сплава (x_{Al}) можно прогнозировать температуру, при которой количество возгоняемой примеси алюминия в конденсированной ртути не будет превышать заданную величину: для x_{Al} (ат. % / масс. %) равного 10/1,35 при 550°C значения y_{Al} (ат. % / масс. %) составляют $1,84 \cdot 10^{-16}/0,25 \cdot 10^{-16}$, а для 800°C – y_{Al} (ат. % / масс. %) достигает $1,081 \cdot 10^{-12}/0,146 \cdot 10^{-12}$. В этом случае, при увеличении температуры возгонки на 250°C , содержание Al в Hg-конденсате возрастает в 5870 раз.

Активности Hg и Al (a_{Hg} , a_{Al}) в расплаве определены с использованием рассчитанных значений коэффициентов активности этих компонентов (γ_{Hg} , γ_{Al}) (см. рис. 3, табл. 3).

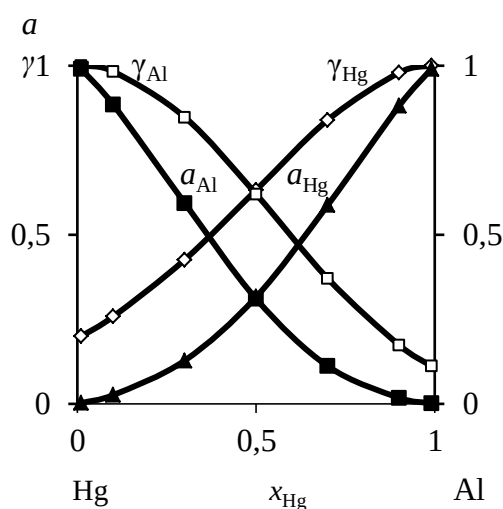


Рис. 3. Активности (a) и коэффициенты активности (γ) компонентов Hg–Al сплава при температуре 823 K
Fig. 3. Activities (a) and activity coefficients (γ) of Hg–Al alloy components at the temperature of 823 K

При построении «Т-х» диаграммы бинарной системы Hg–Al для каждой фиксированной температуры подбирали состав сплава (x_{Hg}), при котором сумма парциальных давлений ртути и алюминия уравнивала внешнее давление (рис. 4 а, табл. 6).

Установлено, что при увеличении глубины вакуума переход из жидкой в газовую фазу происходит в более узком диапазоне температур и способствует разделению Hg и Al, а именно: для получения конденсата ртути с возгонкой 90–99% элемента при давлении 133/13,3/1,33 Па и температуре 632–525/538–458/468–406 К содержание примеси алюминия составит не более $1,9 \cdot 10^{-16}/8,7 \cdot 10^{-20}/4 \cdot 10^{-23}$ мол. долей, что свидетельствует о благоприятном воздействии низкого остаточного давления в системе и, соответственно, температуры процесса на селективность при заданной степени возгонки ртути. Одновременно в кубовом остатке в указанных интервалах давления и температуры содержание алюминия возрастает на 90–99% металла.

Определены значения относительного ($S_i = 1,42\%$) и квадратичного ($S_i^* = 7,54 \text{ К}$) отклонений между вычисленными и опытными значениями температур (рис. 4 а). Относительно невысокие абсолютные значения вычисленных средних отклонений свидетельствуют об адекватности модели процесса вакуумной дистилляции бинарного сплава в исследованных интервалах изменения давления (Р) и температуры (Т). Для фазовых диаграмм VLE может быть использовано правило рычага (правило отрезков) для прогнозирования количества вещества, остатков и возгонов при заданной температуре. Пред-

полагая, что мол. доля Hg в сырье сплава $x_o = 0,5$, соответствующая температуре перегонки 490 К и давлению 133 Па, по правилу «рычага» может быть построена линия связи АВ на «Т-х» диаграмме (рис. 4 а), где кривые жидкости и пара пересекаются в точке А и В. Когда система достигает равновесия, составы А и В равняются x_{liq} и y_{gas} , соответственно. По правилу рычага:

$$\frac{n_{\text{liq}}}{n_{\text{gas}}} = \frac{x_o - y_{\text{gas}}}{x_{\text{liq}} - x_o} = \frac{|OB|}{|OA|} = \frac{0,5 - 0,999}{0,2 - 0,5} = \frac{0,499}{0,3},$$

где $n_{\text{liq}} = 0,499$ и $n_{\text{gas}} = 0,3$ – количество вещества в остатках и возгонах; $|OB|$ и $|OA|$ – длина соответствующих отрезков на линии АВ. Общее количество молей вещества исходного сплава будет n , следовательно $n = n_{\text{liq}} + n_{\text{gas}}$:

$$n_{\text{liq}} = \frac{x_o - y_{\text{gas}}}{x_{\text{liq}} - y_{\text{gas}}} n = \frac{|OB|}{|AB|} n = \frac{0,499}{0,799} n = 0,625 n,$$

$$n_{\text{gas}} = \frac{x_{\text{liq}} - x_o}{x_{\text{liq}} - y_{\text{gas}}} n = \frac{|OA|}{|AB|} n = \frac{0,3}{0,799} n = 0,375 n.$$

Результаты расчета диаграмм «Р-х» представлены на рис. 4 б, табл. 7, 8.

Диаграмма «Р-х» иллюстрирует возможность управления процессом дистилляции Hg–Al сплава при фиксированной температуре путем изменения величины остаточного давления в системе. Например, при температуре 823 К равновесное содержание 0,1 – мол. доля ртути в кубовом остатке, что соответствует 90% возгонке элемента, достигается при давлении $p_{\text{liq}} = 0,37 \cdot 10^5$ Па. При повышении температуры до 1023 К аналогичная степень возгонки ртути достигается при

Таблица 6. Рассчитанные значения T_{liq} , y_{Al} Hg–Al сплава для «Т-х» диаграмм
Table 6. Calculated values of T_{liq} , y_{Al} of the Hg–Al alloy for "T-x" diagrams

Р, Па	x_{Hg}	0,01	0,03	0,05	0,10	0,90	0,95	0,97	0,99
133	$T_{\text{liq}}, \text{К}$	632,5	580,0	557,5	525,6	399,2	397,0	396,2	395,69
	y_{Al}	$1,88 \cdot 10^{-16} - 1,59 \cdot 10^{-21}$				$3,68 \cdot 10^{-34} - 2,83 \cdot 10^{-36}$			
13,3	$T_{\text{liq}}, \text{К}$	538,1	499,8	482,4	458,1	353,48	351,53	350,93	350,46
	y_{Al}	$8,71 \cdot 10^{-20} - 6,49 \cdot 10^{-25}$				$9,77 \cdot 10^{-39} - 3,52 \cdot 10^{-41}$			
1,33	$T_{\text{liq}}, \text{К}$	468,2	438,8	425,3	405,9	317,21	315,45	314,92	314,52
	y_{Al}	$4,01 \cdot 10^{-23} - 2,65 \cdot 10^{-28}$				$1,99 \cdot 10^{-43} - 3,24 \cdot 10^{-46}$			

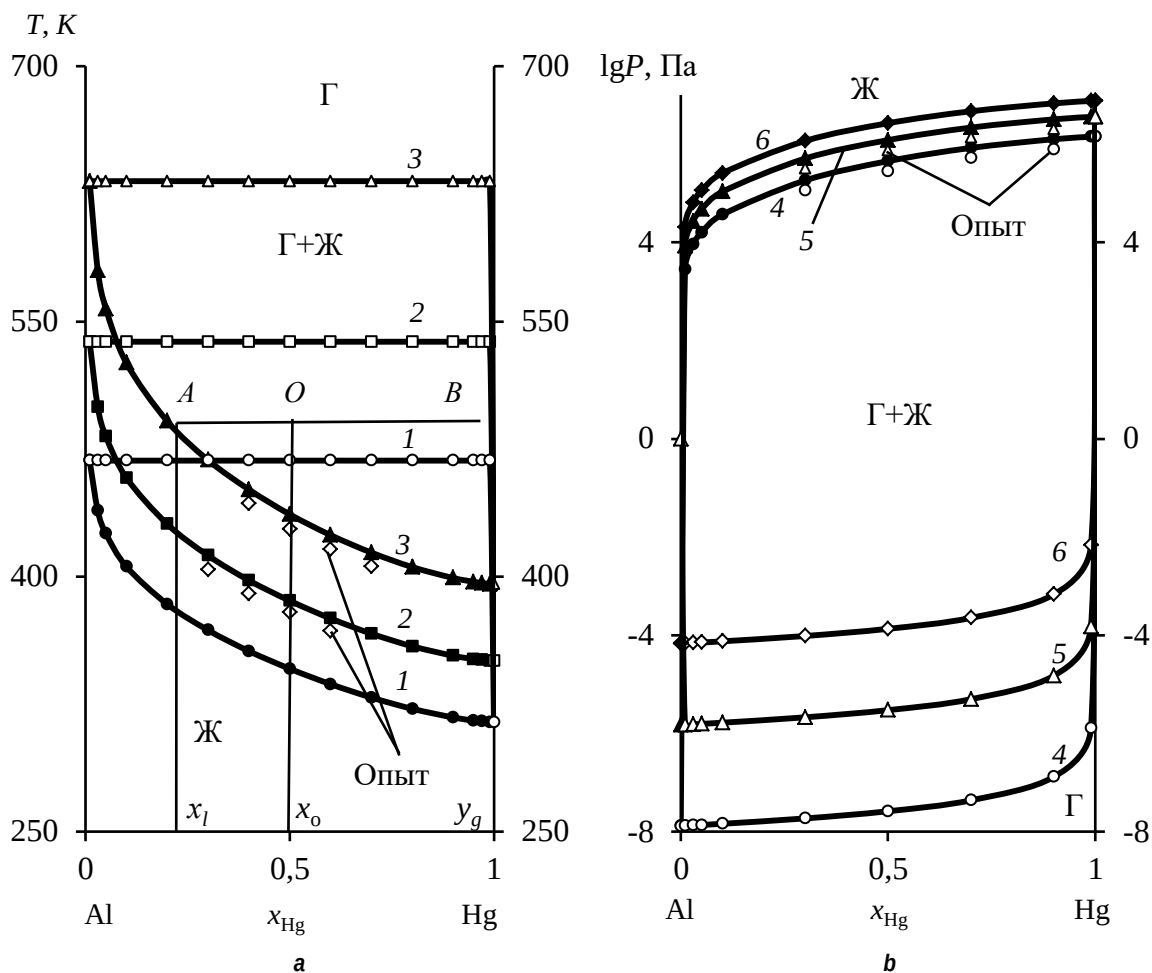


Рис. 4. Фазовые диаграммы «Т-х» (а) и «Р-х» (б) Hg-Al сплава при P , Па: 1,33 (1); 13,33 (2); 133,3 (3) и T , К: 823 (4); 923 (5); 1023 (6)
Fig. 4. Phase diagrams of "T-x" (a) and "P-x" (b) of the Hg-Al alloy at P , Pa: 1.33 (1); 13.33 (2); 133.3 (3) and T , K: 823 (4); 923 (5); 1023 (6)

Таблица 7. Рассчитанные значения $P_{\text{liq}} \cdot 10^6$ (Па) Hg-Al сплава
Table 7. Calculated values of $P_{\text{liq}} \cdot 10^6$ (Pa) of the Hg-Al alloy

T, K	x_{Hg}				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	0,037	0,181	0,448	0,832	1,25
923	0,107	0,506	1,199	2,158	3,177
1023	0,254	1,153	2,649	4,634	6,714

Таблица 8. Значения x_{Hg} , P_{gas} (Па), y_{Hg} , $y_{\text{Al}} = 1,0$ для «Р-х» диаграмм Hg-Al сплава
Table 8. Values x_{Hg} , P_{gas} (Pa), y_{Hg} , $y_{\text{Al}} = 1.0$ for "P-x" diagrams of the Hg-Al alloy

T, K	y_{Hg}	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	$x_{\text{Hg}} \cdot 10^{-14}$	0,534	2,061	4,808	11,82	43,28
	y_{Hg}			0,193		
	$P_{\text{gas}} \cdot 10^{-8}$	1,462	1,88	2,631	4,386	13,16
923	$x_{\text{Hg}} \cdot 10^{-12}$	0,203	0,783	1,826	4,262	16,44
	y_{Hg}			0,229		
	$P_{\text{gas}} \cdot 10^{-6}$	1,669	2,146	3,004	5,007	15,02
1023	$x_{\text{Hg}} \cdot 10^{-11}$	0,38	1,465	3,419	7,975	30,77
	y_{Hg}			0,262		
	$P_{\text{gas}} \cdot 10^{-4}$	0,755	0,970	1,359	2,264	6,793

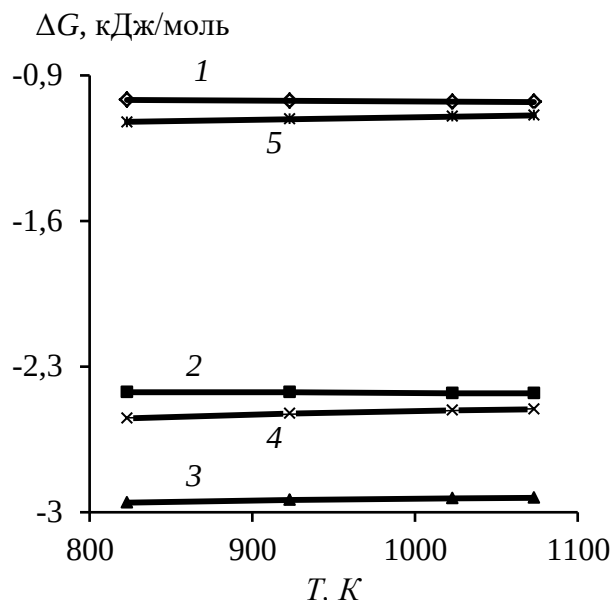


Рис. 5. Зависимость « $\Delta G - T$ » для Hg–Al сплава при x_{Hg} : 0,1 (1); 0,3 (2); 0,5 (3); 0,7 (4); 0,9 (5)
 Fig. 5. " $\Delta G - T$ " dependence for the Hg–Al alloy at x_{Hg} : 0.1 (1); 0.3 (2); 0.5 (3); 0.7 (4); 0.9 (5)

Таблица 9. Рассчитанные значения ΔG_m^E , ΔH_m^E , ΔS_m^E Hg–Al сплава
 Table 9. Calculated values of G_m^E , ΔH_m^E , ΔS_m^E of the Hg–Al alloy

T, K	$-\Delta G_m^E$, кДж/моль				
	x_{Hg}				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
823	1,019	2,423	2,952	2,547	1,126
923	1,023	2,423	2,940	2,525	1,110
1023	1,028	2,427	2,933	2,510	1,099
1073	1,030	2,429	2,931	2,504	1,094
$-\Delta H_m^E$, кДж/моль	0,982	2,401	3,019	2,686	1,229
ΔS_m^E , Дж/моль·K	–0,044	–0,025	0,084	0,171	0,127

большем значении остаточного давления $p_{\text{liq}} = 2,54 \cdot 10^5$ Па. Содержание ртути в газовой фазе $y_{\text{Hg}} = 90\%$ при температуре 823/1023 K обеспечивается при давлении $P_{\text{gas}} = 1,3 \cdot 10^{-7}/6,8 \cdot 10^{-4}$ Па. Данные «P–x» диаграмм дополняют сведения «T–x» диаграмм для бинарного сплава Hg–Al.

Изменение энергии Гиббса ΔG_m^E для бинарной смеси Hg–Al определяется процессом удерживания вещества в пограничном слое фаз при переходе «жидкость–газ», обусловленном соотношением компонентов в сплаве и температурой системы (рис. 5, табл. 9).

Величина изменения энтальпии пограничного слоя (ΔH_m^E) определяется энергией Гиббса и теплотой образования поверхности ($T\Delta S_m^E$), где ΔS_m^E – изменение энтропии. От-

рицательные значения изменения энтальпии $\Delta H_m^E < 0$ свидетельствуют об экзотермическом процессе дистилляции компонентов Hg–Al сплава. Небольшие значения изменения энергии Гиббса $\Delta G_m^E \leq 3,0$ кДж/моль отражают слабое взаимодействие между атомами ртути и алюминия в составе сплава, что на два порядка меньше энергии межатомного взаимодействия в твердой фазе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для расчета коэффициентов активности компонентов Hg–Al сплава использована упрощенная версия объемной модели молекулярного SMIVM.

2. Для предварительного выбора температуры и давления системы оценки эффек-

тивности разделения компонентов при вакуумной перегонке используют фазовые диаграммы температуры (T - x) и давления (P - x).

3. В интервале температур 823–1073 К рассчитаны давления насыщенного пара для Hg ($p_{\text{Hg}}^* = 1,42 \cdot 10^6 - 1,05 \cdot 10^7$ Па) и Al ($p_{\text{Al}}^* = 1,33 \cdot 10^{-8} - 3,54 \cdot 10^{-4}$ Па). Высокие значения соотношения $p_{\text{Hg}}^* / p_{\text{Al}}^* = 1,07 \cdot 10^{14} - 2,96 \cdot 10^{10}$ и коэффициента разделения $\log \beta_{\text{Hg}} = 10,02 - 14,78$ создают теоретические предпосылки для селективного выделения этих металлов вакуумной дистилля-

цией, когда газовая фаза обогащается ртутью ($\beta_{\text{Hg}} > 1$), а жидкая – алюминием.

4. Мольная доля алюминия в газовой фазе $y_{\text{Al}} \leq 8,51 \cdot 10^{-10} - 1,84 \cdot 10^{-16}$ уменьшается со снижением температуры 1073–823 К и мольной доли металла в сплаве $x_{\text{Al}} = 0,9 - 0,1$.

5. Для границы раздела фаз «жидкость–газ» Hg–Al сплава определены значения изменения энергии Гиббса, энтальпии и энтропии: $-\Delta G_m^E = 1,02 - 2,95$ кДж/моль; $-\Delta H_m^E = 0,98 - 3,02$ кДж/моль; $\pm \Delta S_m^E = 0,025 - 0,171$ Дж/моль·К.

Список источников

1. Zhang Lei, Zhang Xiaowei, Li Zong-an, Chen De-hong. Distribution model of lowly volatile impurity in rare earth metal purified by vacuum distillation // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 262. P. 118314. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118314>.
2. Wang D., Chen Y., Li Y., Yang B. Experimental investigation and modeling of the Cu–Sn system in vacuum distillation // Calphad. 2020. Vol. 70. P. 101991. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2020.101991>.
3. Zhang Xiaofeng, Liu Dachun, Jiang Wenlong, Xu Wenjie, Deng Pan, Deng Juhai, et al. Application of multi-stage vacuum distillation for secondary resource recovery: potential recovery method of cadmium telluride photovoltaic waste // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. Iss. 4. P. 6977–6986. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.032>.
4. Zhang Xiaofeng, Huang Daxin, Jiang Wenlong, Zha Guozheng, Deng Juhai, Deng Pan, et al. Selective separation and recovery of rare metals by vulcanization-vacuum distillation of cadmium telluride waste // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 230. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.115864>.
5. Xiong Neng, Tian Yang, Yang Bin, Xu Baoqiang, Dai T., Dai Yong-nian. Results of recent investigations of magnesia carbothermal reduction in vacuum // Vacuum. 2019. Vol. 160. P. 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.11.007>.
6. Liu Tiantian, Qiu Keqiang. Removing antimony from waste lead storage batteries alloy by vacuum displacement reaction technology // Journal of Hazardous Materials. 2018. Vol. 347. P. 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.017>.
7. Jiang Wen-Long, Deng Yong, Yang Bin, Liu Da-Chun, Dai Yong-Nian, Xu Bao-Qiang. Application of vacuum distillation in refining crude indium // Rare Metals. 2013. Vol. 32. Iss. 6. P. 627–631. <https://doi.org/10.1007/s12598-013-0169-z>.
8. Yang Bin, Zha Guozheng, Hartley William, Kong Xiangfeng. Sustainable extraction of lead and re-use of valuable metals from lead-rich secondary materials // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 219. P. 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.011>.
9. Королев А. А., Краюхин С. А., Мальцев Г. И. Равновесные системы «газ–жидкость» для сплава Sn–Sb при вакуумной дистилляции // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2019. № 4. С. 488–503. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0151>.
10. Королев А. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И. Фазовые равновесия для Pb–Bi сплава при вакуумной дистилляции // Расплавы. 2020. № 3. С. 313–327. <https://doi.org/10.31857/S0235010620030056>.
11. Королев А. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И. Фазовые равновесия для Zn–Ag сплава при вакуумной дистилляции // Расплавы. 2021. № 2. С. 172–186. <https://doi.org/10.31857/S0235010621020043>.
12. Королев А. А., Шунин В. А., Тимофеев К. Л., Мальцев Г. И., Воинков Р. С. Фазовые равновесия в системе Se–Al при вакуумной дистилляции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 4. С. 5–14. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2021.4.01>.
13. Bolzoni L., Ruiz-Navas E. M., Gordo E. Quantifying the properties of low-cost powder metallurgy titanium alloys // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 687. P. 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.049>.
14. Dong Longlong, Chen Wenge, Hou Lintao, Wang Jiaojiao, Song Jiulong. Metallurgical and mechanical examinations of molybdenum/graphite joints by vacuum arc pressure brazing using Ti–Zr filler materials // Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 249. P. 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.007>.
15. Martín F., García C., Blanco Y., Rodríguez-Mendez M. L. Influence of sinter-cooling rate on the mechanical properties of powder metallurgy austenitic, ferritic, and duplex stainless steels sintered in vacuum // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 642. P. 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.097>.
16. Jiang WenLong, Zhang Cheng, Xu Na, Yang Bin, Xu BaoQiang, Liu DaChun, et al. Experimental investigation and modelling of phase equilibria for the Ag–Cu–Pb system in vacuum distillation // Fluid Phase Equilibria. 2016. Vol. 417. P. 19–24.

<https://doi.org/10.1016/j.fluid.2016.02.026>.

17. Kong Lingxin, Yang Bin, Li Yifu, Xu Baoqiang, Liu Dachun, Jia Guobin. Application of MIVM for Pb–Sn system in vacuum distillation // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2012. Vol. 43. P. P. 1649–1656. <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9726-3>.
 18. Kong Xiang-feng, Yang Bin, Xiong Heng, Kong Lingxin, Liu Da-chun, Xu Bao-qiang. Thermodynamics of removing impurities from crude lead by vacuum distillation refining // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24. Iss. 6. P. 1946–1950. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63275-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63275-1).
 19. Yang HongWei, Xu BaoQiang, Yang Bin, Ma Wenhui, Tao DongPing. Calculation of phase equilibrium in vacuum distillation by molecular interaction volume model // *Fluid Phase Equilibria*. 2012. Vol. 341. P. 78–81. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.10.027>.
 20. Thirunavukarasu G., Chatterjee S., Kundu S. Scope for improved properties of dissimilar joints of ferrous and non-ferrous metals // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. Vol. 27. Iss. 7. P. 1517–1529. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60172-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60172-9).
 21. Klippenstein S. J. From theoretical reaction dynamics to chemical modeling of combustion // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017. Vol. 36. Iss. 1. P. 77–111. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.100>.
 22. Górak A., Olujić Z. Modeling of Distillation Processes // *Distillation: fundamentals and principles* / eds. A. Gorak, E. Sorensen. Chapter 10. Academic Press, 2014. P. 383–436.
 23. Huang Liuqing, Lai Huixian, Gan Chuanhai, Xiong Huaping, Xing Pengfei, Luo Xuetao. Separation of boron and phosphorus from Cu-alloyed metallurgical grade silicon by CaO–SiO₂–CaCl₂ slag treatment // *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 170. P. 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.004>.
 24. Jaeger W. Heat transfer to liquid metals with empirical models for turbulent forced convection in various geometries // *Nuclear Engineering and Design*. 2017. Vol. 319. P. 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.028>.
 25. Wilson G. M. Vapor-liquid equilibrium. XI: A new expression for the excess free energy of mixing // *Journal American Chemical Society*. 1964. Vol. 86. Iss. 2. P. 127–130.
- ### References
1. Zhang Lei, Zhang Xiaowei, Li Zong-an, Chen De-hong. Distribution model of lowly volatile impurity in rare earth metal purified by vacuum distillation. *Separation and Purification Technology*. 2021;262:118314. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118314>.
 2. Wang D., Chen Y., Li Y., Yang B. Experimental investigation and modeling of the Cu–Sn system in vacuum distillation. *Calphad*. 2020;70:101991. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2020.101991>.
 3. Zhang Xiaofeng, Liu Dachun, Jiang Wenlong, Xu Wenjie, Deng Pan, Deng Juhai, et al. Application of multi-stage vacuum distillation for secondary resource recovery: potential recovery method of cadmium telluride photovoltaic waste. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(4):6977–6986. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.032>.
 4. Zhang Xiaofeng, Huang Daxin, Jiang Wenlong, Zha Guozheng, Deng Juhai, Deng Pan, et al. Selective separation and recovery of rare metals by vulcanization-vacuum distillation of cadmium telluride waste. *Separation and Purification Technology*. 2020;230. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.115864>.
 5. Xiong Neng, Tian Yang, Yang Bin, Xu Baoqiang, Dai T., Dai Yong-nian. Results of re-cent investigations of magnesia carbothermal reduction in vacuum. *Vacuum*. 2019;160:213–225. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.11.007>.
 6. Liu Tiantian, Qiu Keqiang. Removing antimony from waste lead storage batteries alloy by vacuum displacement reaction technology. *Journal of Hazardous Materials*. 2018;347:334–340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.017>.
 7. Jiang Wen-Long, Deng Yong, Yang Bin, Liu Da-Chun, Dai Yong-Nian, Xu Bao-Qiang. Application of vacuum distillation in refining crude indium. *Rare Metals*. 2013;32(6):627–631. <https://doi.org/10.1007/s12598-013-0169-z>.
 8. Yang Bin, Zha Guozheng, Hartley William, Kong Xiangfeng. Sustainable extraction of lead and re-use of valuable metals from lead-rich secondary materials. *Journal of Cleaner Production*. 2019;219:110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.011>.
 9. Korolev A. A., Krayukhin S. A., Maltsev G. I. The Equilibrium of the System “Gas–Liquid” for Alloy Sn–Sb in Vacuum Distillation. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering & technologies*. 2019;4:488–503. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0151>.
 10. Korolev A. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I. Phase equilibria for Pb–Bi alloy during vacuum distillation. *Rasplavy*. 2020;3:313–327. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0235010620030056>.
 11. Korolev A. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I. Phase equilibria for Zn–Ag alloy during vacuum distillation. *Rasplavy*. 2021;2:172–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0235010621020043>.
 12. Korolev A. A., Shanin V. A., Timofeev K. L., Maltsev G. I., Voinkov R. S. Phase equilibria in the Se–Al system during vacuum distillation. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2021;23(4):5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2021.4.01>.
 13. Bolzoni L., Ruiz-Navas E. M., Gordo E. Quantifying the properties of low-cost powder metallurgy titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;687:47–53. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.049>.
 14. Dong Longlong, Chen Wenge, Hou Lintao, Wang Jiaojiao, Song Jiulong. Metallurgical and mechanical examinations of molybdenum/graphite joints by vacuum arc pressure brazing using Ti–Zr filler materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;249:39–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.007>.
 15. Martín F., García C., Blanco Y., Rodríguez-Mendez M.

L. Influence of sinter-cooling rate on the mechanical properties of powder metallurgy austenitic, ferritic, and duplex stainless steels sintered in vacuum. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;642:360-365. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.097>.

16. Jiang WenLong, Zhang Cheng, Xu Na, Yang Bin, Xu BaoQiang, Liu DaChun, et al. Experimental investigation and modelling of phase equilibria for the Ag–Cu–Pb system in vacuum distillation. *Fluid Phase Equilibria*. 2016;417:19-24. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2016.02.026>.

17. Kong Lingxin, Yang Bin, Li Yifu, Xu Baoqiang, Liu Dachun, Jia Guobin. Application of MVM for Pb–Sn system in vacuum distillation. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2012;43:1649-1656. <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9726-3>.

18. Kong Xiang-feng, Yang Bin, Xiong Heng, Kong Lingxin, Liu Da-chun, Xu Bao-qiang. Thermodynamics of removing impurities from crude lead by vacuum distillation refining. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014;24(6):1946-1950. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63275-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63275-1).

19. Yang HongWei, Xu BaoQiang, Yang Bin, Ma Wenhui, Tao DongPing. Calculation of phase equilibrium in vacuum distillation by molecular interaction volume model. *Fluid Phase Equilibria*. 2012;341:78-81.

<https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.10.027>.

20. Thirunavukarasu G., Chatterjee S., Kundu S. Scope for improved properties of dissimilar joints of ferrous and non-ferrous metals. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(7):1517-1529. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60172-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60172-9).

21. Klippenstein S. J. From theoretical reaction dynamics to chemical modeling of combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017;36(1):77-111. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.100>.

22. Górak A., Olujić Z. Modeling of Distillation Processes. In: Gorak A., Sorensen E. (eds.). *Distillation: fundamentals and principles*. Chapter 10. Academic Press; 2014, p. 383-436.

23. Huang Liuqing, Lai Huixian, Gan Chuanhai, Xiong Huaping, Xing Pengfei, Luo Xuetao. Separation of boron and phosphorus from Cu-alloyed metallurgical grade silicon by CaO–SiO₂–CaCl₂ slag treatment. *Separation and Purification Technology*. 2016;170:408-416. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.004>.

24. Jaeger W. Heat transfer to liquid metals with empirical models for turbulent forced convection in various geometries. *Nuclear Engineering and Design*. 2017;319:12-27. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.028>.

25. Wilson G. M. Vapor-liquid equilibrium. XI: A new expression for the excess free energy of mixing. *Journal American Chemical Society*. 1964;86(2):127-130.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Королев Алексей Анатольевич,
кандидат технических наук,
главный инженер,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Шунин Владимир Александрович,
заместитель начальника,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Тимофеев Константин Леонидович,
доктор технических наук,
доцент кафедры металлургии,
Технический университет Уральской горно-
металлургической компании;
начальник технического отдела,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Мальцев Геннадий Иванович,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
главный специалист,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. Korolev,
Cand. Sci. (Eng.),
Chief Engineer of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Vladimir A. Shunin,
Deputy Head of the
Research Center of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Konstantin L. Timofeev,
Dr. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Metallurgy,
Technical University of Ural Mining and Metallurgical
Company,
Head of the Technical Department
of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Gennady I. Maltsev,
Dr. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Chief Specialist of the Research Center
of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Воинков Роман Сергеевич,
кандидат технических наук,
начальник ИЦ АО «Уралэлектромедь»,
Исследовательский центр АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский просп., 1,
Россия

Roman S. Voinkov,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Research Center of JSC “Uralelectromed”,
Research Center of JSC “Uralelectromed”,
1, Uspensky Ave., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.01.2022; одобрена после рецензирования 22.03.2022; принята к публикации 27.05.2022.

Information about the article

The article was submitted 18.01.2022; approved after reviewing 22.03.2022; accepted for publication 27.05.2022.

METALLURGY

Original article

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-348-356>

Physicochemical parameters of a hydrochemical technology employing sodium chloride to obtain cryolite used in aluminium production

Khaydar Safiev^{1✉}, Nosir A. Naimov², Jura R. Ruziev³, Ibrokhim Sh. Akhmadshoev⁴,
A'zamjon M. Juraqulov⁵, Asror Murodiyov⁶, Nina V. Nemchinova⁷

^{1,2,4,5,6} Scientific Research Institute of Metallurgy JSC TALCO, Dushanbe, Tajikistan

³ Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan

⁷ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹ inmet.talco@mail.ru

² nosser2016@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-0405-1537>

³ gyra71@mail.ru

⁴ ibrohim.ahmadshoev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4623-8287>

⁵ naza1995naz@gmail.com

⁶ inmet.talco@mail.ru

⁷ ninavn@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Abstract. The paper aims to study the physicochemical parameters of a hydrochemical technology employing hydrofluoric acid and local mineral resources (sodium chloride) to obtain cryolite used in the electrolysis of cryolite-alumina melts. In order to determine the elemental chemical and phase compositions of initial, intermediate, and final products, titration and X-ray diffraction analysis (using an upgraded Dron-2 unit) were employed. The conducted studies indicate that the proposed process of cryolite production from hydrofluoric acid at 28–30% concentration using aluminium hydroxide and a concentrated sodium chloride solution occurs at 25°C for 10–15 min. The yield of cryolite reaches 87.6%, while ~12% of cryolite remains dissolved in the hydrochloric acid solution. With the temperature rising from 25°C to 95°C, the cryolite yield is shown to decrease from 87.6% to 69.3% due to its higher solubility in the formed hydrochloric acid. The cryolite production process was validated via X-ray diffraction analysis. The analysed sample was found to be consistent with the cryolite reference, i.e., indicating an interaction between sodium chloride and fluoroaluminic acid. The conducted studies served as a basis for developing a process flow diagram of hydrochemical cryolite production using hydrofluoric acid, aluminium hydroxide, and sodium chloride. The conducted studies revealed that the technology of cryolite production employing sodium chloride is easy to implement and cost-effective due to the use of local mineral resources and low energy consumption.

Keywords: aluminum production, cryolite, aluminum hydroxide, sodium chloride, electrolyte, hydrofluoric acid

For citation: Safiev Kh., Naimov N. A., Ruziev J. R., Akhmadshoev I. Sh., Juraqulov A. M., Murodiyov A., Nemchinova N. V. Physico-chemical aspects of the technology for obtaining the cryolite used for the production of aluminum by a hydrochemical method using common salt. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):348-356. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-348-356>.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья
УДК 66.012.2:66.012.3

Физико-химические аспекты технологии получения криолита, используемого для производства алюминия, гидрохимическим способом с использованием поваренной соли

Хайдар Сафиев^{1✉}, Носир Абдурахмонович Наимов², Джура Рахимназарович Рузиев³,
Иброхим Шарифович Ахмадшоев⁴, Аъзамджон Мусурмонкулович Джуракулов⁵,
Асрор Муродиён⁶, Нина Владимировна Немчинова⁷

^{1,2,4,5,6} Научно-исследовательский институт металлургии ОАО «ТалКо»,

г. Душанбе, Республика Таджикистан

³ Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Республика Таджикистан

⁷ Иркутский национальный исследовательский технический университет,

г. Иркутск, Россия

¹ inmet.talco@mail.ru

² nosser2016@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0003-0405-1537>

³ gyra71@mail.ru

⁴ ibrohim.ahmadshoev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4623-8287>

⁵ naza1995naz@gmail.com

⁶ inmet.talco@mail.ru

⁷ ninavn@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Резюме. Цель – изучение физико-химических параметров технологии производства криолита, используемого при электролизе криолит-глиноземных расплавов, гидрохимическим способом с применением производимой плавиковой кислоты и местного минерального сырья – хлорида натрия. Употреблены титриметрический и рентгеноструктурный (с использованием модернизированной установки Дрон-2) методы анализа с целью определения химического элементного и фазового составов исходного, промежуточного и конечного продуктов. Проведенные исследования показали, что процесс получения криолита предлагаемым способом из плавиковой кислоты 28–30% концентрации с использованием гидроксида алюминия и концентрированного раствора хлорида натрия протекает при температуре 25°C в течение 10–15 мин. При этом выход криолита достигает 87,6%, а ~12% криолита остается в растворе соляной кислоты в растворенном виде. Показано, что с повышением температуры в интервале от 25°C до 95°C наблюдается снижение выхода криолита с 87,6% до 69,3%, связанное с повышением его растворимости в образующейся соляной кислоте. Достоверность протекания процесса получения криолита с применением поваренной соли подтверждена результатами рентгенофазового анализа. Установлено, что анализируемая проба соответствует эталону криолита, свидетельствуя о взаимодействии хлорида натрия и фторалюминиевой кислоты. На основе проведенных исследований была разработана принципиальная технологическая схема производства криолита гидрохимическим способом с применением плавиковой кислоты, гидроксида алюминия и поваренной соли. В результате проведенных исследований установлено, что технология получения криолита с применением поваренной соли проста в осуществлении и экономически эффективна за счет использования местного минерального сырья и малой энергозатратности производства.

Ключевые слова: производство алюминия, криолит, гидроксид алюминия, хлорид натрия, электролит, плавиковая кислота

Для цитирования: Сафиев Х., Наимов Н. А., Рузиев Дж. Р., Ахмадшоев И. Ш., Джуракулов А. М., Муродиён А., Немчинова Н. В. Физико-химические аспекты технологии получения криолита, используемого для производства алюминия, гидрохимическим способом с использованием поваренной соли // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 348–356 (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-348-356>.

INTRODUCTION

Aluminium is one of the world's most in-demand metals. Due to its low density and high strength, aluminium is widely used in construction, as well as in the manufacture of car parts, aircraft, etc., which results in an annual output of

nearly 70 million tonnes of aluminium. For over 120 years, it has been produced using the Hall-Héroult process⁸ [1–12].

The electrolyte in electrolyzers used for aluminium production performs several essential

functions such as charge transfer, dissolution, and mass transfer of electrode products. The proper performance of these functions depends solely on physicochemical properties, namely electrical conductance, viscosity, vapour pressure, solidus and liquidus temperatures, density, surface tension, the solubility and dissolution rate of aluminium oxide, carbon oxide, and various compounds, as well as the following operating parameters: temperature, current density, anode-cathode distance, etc. The electrolyte affects the current output and cell voltage, which determine the specific energy consumption and the overall cost of aluminium [13–20].

Fluoride salts – cryolite and aluminium fluoride – constitute essential electrolyte components. Since natural cryolite is rare, it is produced synthetically from fluorite to meet the needs of the aluminium industry [21–25].

SUBJECT MATTER OF THE STUDY

In Tajikistan, hydrofluoric acid is currently produced from local minerals (fluorspar) by TALCO Chemical, which is used to obtain cryolite employing imported aluminium and sodium hydroxides [26].

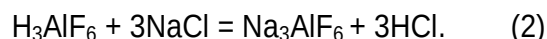
At this plant, along with concentrated hydrofluoric acid, acid at 30% concentration is pro-

duced during the sulphatisation of fluorite. Thus, the hydrochemical production of cryolite using hydrofluoric acid at 30% and sodium chloride was studied.

Under laboratory conditions, parameters for processing hydrofluoric acid at 28–30% concentration using aluminium hydroxide to produce fluoroaluminic acid were determined as per the following equation:



The resulting fluoroaluminic acid was treated with sodium chloride to produce cryolite according to the reaction equation:



The main parameters in the production of fluoroaluminic acid include temperature and process duration.

The temperature dependence of the fluoroaluminic acid yield was investigated within a temperature range of 25°C to 95°C at a constant process duration of 10 min. Within this temperature range, a yield reduction from 97.5% to 74.8% was observed (fig. 1 a).

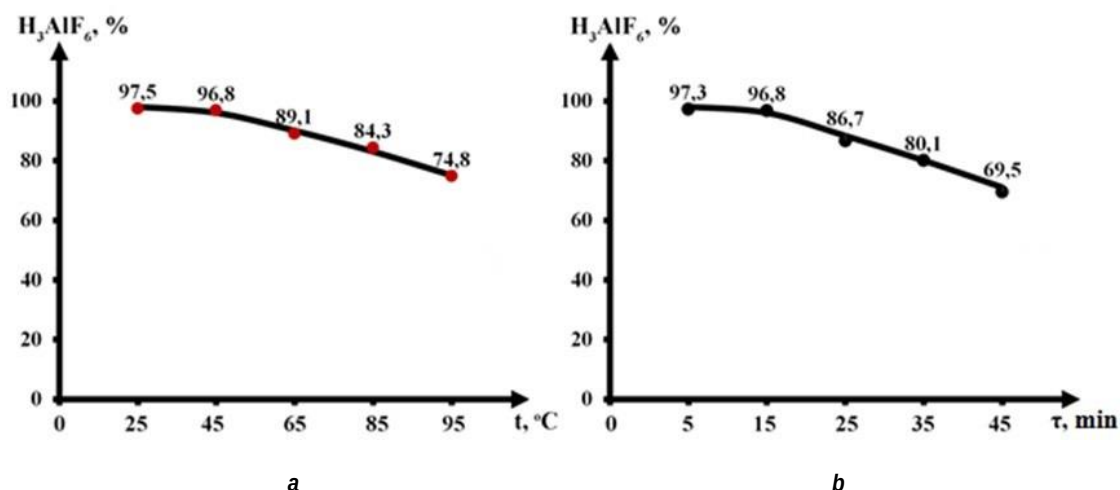


Fig. 1. Dependence of the fluoroaluminic acid yield on temperature (a) and process duration (b)

Рис. 1. Зависимость выхода фторалюминиевой кислоты от температуры (a) и продолжительности процесса (b)

It can be seen in fig. 1 a that the yield of fluoroaluminic acid decreases at higher process

⁸ Zelberg B. I., Ragozin L. V., Barantsev A. G., Yasevich O. I., Grigoriev V. G., Baranov A. N. Metallurgist's Handbook. Production of aluminum and alloys based on it. St. Petersburg: MANEB; 2013, 143 p. / Зельберг Б. И., Рагозин Л. В., Баранцев А. Г., Ясевич О. И., Григорьев В. Г., Баранов А. Н. Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе. СПб.: МАНЭБ, 2013. 143 с.

temperatures, which can be attributed to the partial evaporation of hydrofluoric acid. Hydrofluoric acid starts to evaporate from the solution at 50–60°C, with the process intensifying at temperatures above 95°C.

Fig. 1 *b* shows the dependence between the yield of fluoroaluminic acid and the process duration. With the process duration varying from 5 to 45 min, a decrease in the yield of fluoroaluminic acid from 97.3% to 69.5% is observed.

The exothermic reaction between aluminium hydroxide and hydrofluoric acid exhibits a reduction in the yield of fluoroaluminic acid as the temperature reaches 60°C or higher due to the evaporation of hydrofluoric and fluoroaluminic acids.

Thus, the rational parameters of fluoroaluminic acid production via the interaction of hydrofluoric acid and aluminium hydroxide are as follows: initial temperature of 25–40°C; duration of 10–15 min.

Experiments were carried out to produce cryolite through the interaction of a fluoroaluminic acid solution with a 25% sodium chloride solution in a stoichiometric ratio according to (2).

The interaction of fluoroaluminic acid with sodium chloride produces hydrochloric acid, whose concentration amounts to 10–12%. Of note is that hydrochloric acid comprises from 10% to 27% of produced cryolite in dissolved state.

The temperature dependence of cryolite

yield was also studied (fig. 2 *a*) at a constant process duration of 10 min. Here, with a temperature increase from 25°C to 95°C, a reduction in the cryolite yield from 87.6% to 69.3% is observed.

With rising temperature (see fig. 2 *a*), the yield of cryolite decreases due to its higher solubility in hydrochloric acid formed in (2).

The dependence of the cryolite yield on process duration was also examined. With the interaction time of reactants increasing from 10 to 50 min, a reduction in the cryolite yield from 87.6% to 82.1% is observed (see fig. 2 *b*). At a longer process duration, a slight decrease in the cryolite yield is clearly also attributable to the dissolution of cryolite in the hydrochloric acid.

Thus, the following rational parameters for hydrochemical cryolite production from hydrofluoric acid using aluminium hydroxide and sodium chloride are determined: temperature – 25°C; duration – 10–15 min; concentration of sodium chloride solution – 25%. Under these conditions, the yield of cryolite reaches 87.6%, while ~12% of cryolite remains dissolved in hydrochloric acid.

Of note is that the used hydrofluoric acid solution contains up to 1.5% of hexafluorosilicic acid that reacts with the aluminium hydroxide to produce silica gel and an aluminium fluoride solution. Following the separation of silica gel via filtration, the aluminium fluoride remains in the solution.

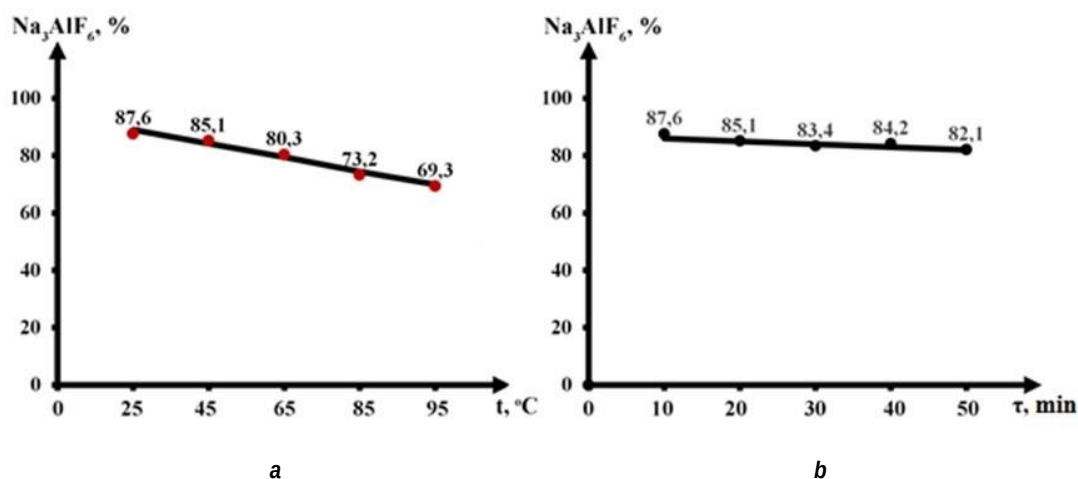


Fig. 2. Dependence of the cryolite yield on temperature (a) and process duration (b)
Рис. 2. Зависимость выхода криолита от температуры (a) и продолжительности процесса (b)

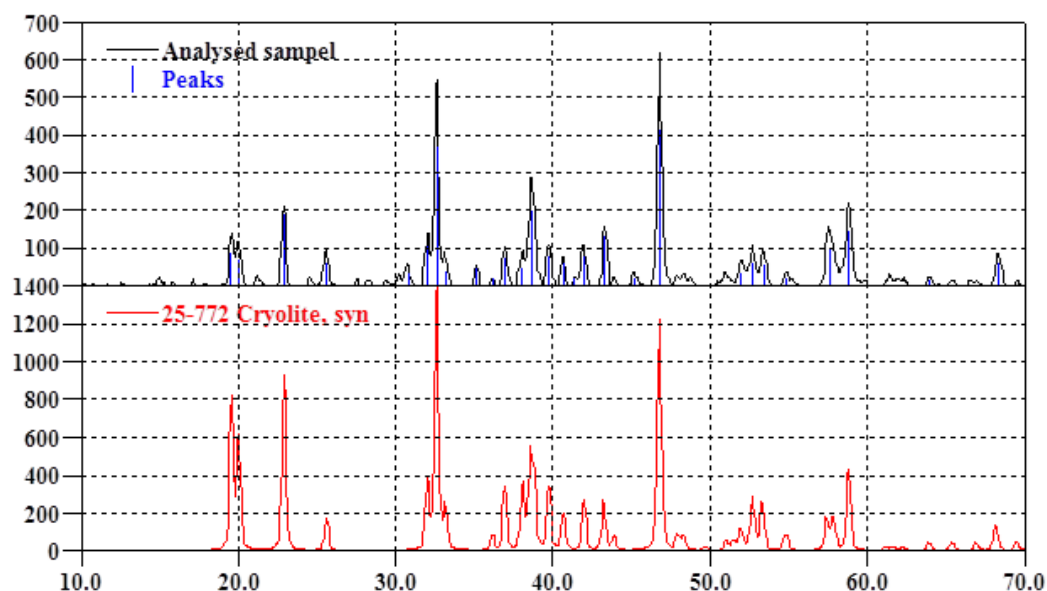


Fig. 3. XRD pattern of synthetic cryolite obtained using sodium chloride
(upper graph – analysed sample; lower reference graph – cryolite)

Рис. 3. Рентгенограмма синтетического криолита, полученного с использованием хлорида натрия
(верхний график – анализируемая проба, нижний эталонный график – криолит)

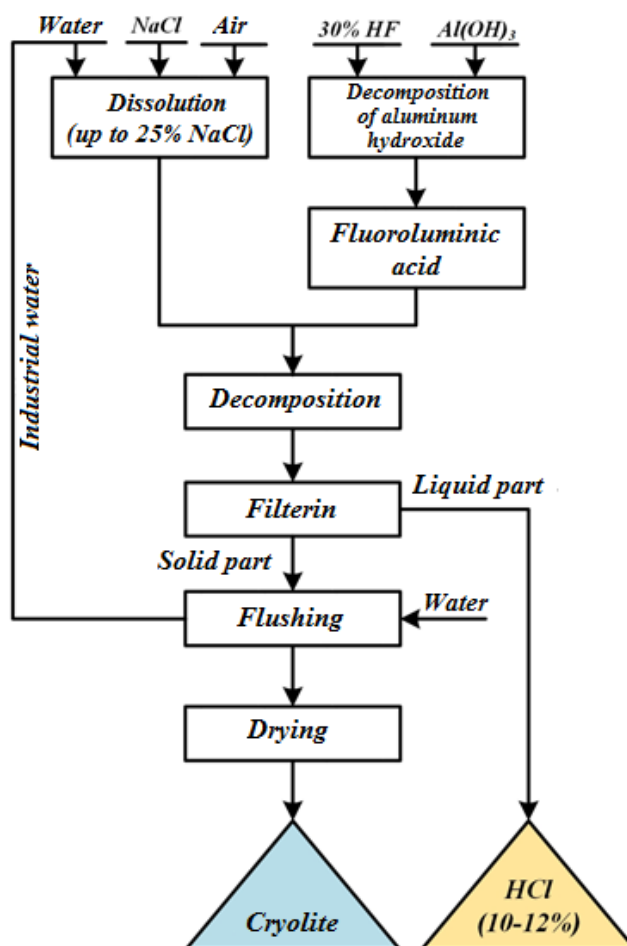


Fig. 4. Process flow diagram for the production of cryolite using sodium chloride

Рис. 4. Принципиальная технологическая схема получения криолита с использованием хлорида натрия

In order to validate the cryolite production process that employs sodium chloride, an X-ray diffraction (XRD) analysis was performed using an upgraded Dron-2 unit (fig. 3).

The obtained XRD pattern shows that the analysed sample (upper graph) is consistent with the reference sample (lower graph), which confirms the interaction between sodium chloride and fluoroaluminic acid resulting in the formation of cryolite.

Thus, the conducted studies served as a basis for developing a process flow diagram of hydrochemical cryolite production using hydrofluoric acid, aluminium hydroxide, and sodium chloride (fig. 4).

According to the provided process flow diagram, the first step involves the decomposition of aluminium hydroxide with hydrofluoric acid to obtain fluoroaluminic acid; the process occurs at 25–30°C for 10–15 min. Then, a 25% sodium

chloride solution is prepared followed by the decomposition of fluoroaluminic acid at room temperature for 15–20 min. The resulting slurry is separated via filtration, while the solids are dried.

The liquid part comprising 10–12% HCl and 12% Na_3AlF_6 in dissolved form can be directly applied as an acidic composition to treat the bottom-hole zone of hot water reservoirs. Cryolite used in the electrolytic production of aluminium is obtained by evaporating the solution, while acid vapours condense or are absorbed by water to produce commercial hydrochloric acid.

CONCLUSION

The conducted studies revealed that the technology of cryolite production using sodium chloride is easy to implement and cost-effective due to the use of local mineral resources and low energy consumption.

References

1. Altenpohl D. G. *Aluminum: technology, applications and environment. A Profile of a modern metal aluminum from within*. 6th Edition. Tukwila: Wiley-TMS; 1998, 488 p.
2. Grjotheim K., Kvande H. *Introduction to aluminium electrolysis*. Dusseldorf: Aluminium Verlag; 1993, 260 p.
3. Thonstad J., Fellner P., Haarberg G. M., Hives J., Kvande H., Sterten A. *Aluminium electrolysis - fundamentals of hall-heroult process*. 3rd edition. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 2001, 372 p.
4. Mincis M. Ya., Polyakov P. V., Sirazutdinov G. A. *Electrometallurgy of aluminium*. Novosibirsk: Nauka; 2001, 368 p. (In Russ.).
5. Haupin W. E. Electrochemistry of the Hall-Heroult process for aluminium smelting. *Journal of Chemical Education*. 1983;60(4):279-282. <https://doi.org/10.1021/ed060p279>.
6. Gunasegaram D. R., Molenaar D. Towards improved energy efficiency in the electrical connections of Hall-Heroult cells through finite element analysis (FEA) modeling. *Journal of Cleaner Production*. 2015;93:174-192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.065>.
7. Polyakov P. V., Klyuchantsev A. B., Yasinskiy A. S., Popov Y. N. Conception of "Dream Cell" in aluminium electrolysis. In: Williams E. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2016, p. 283-288. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_47.
8. Asadikiya M., Yang Songge, Zhang Yifan, Lemay C., Apelian D., Zhong Yu. A review of the design of high-entropy aluminum alloys: a pathway for novel Al alloys. *Journal of Materials Science*. 2021;56:12093-12110. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06042-6>.
9. Tyutrin A. A., Nemchinova N. V., Volodkina A. A. Effects of electrolysis parameters on the technical and economic performance indicators of OA-300M baths. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):906-918. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>.
10. Korenko M., Priščák J., Šimko F. Electrical conductivity of system based on Na_3AlF_6 - SiO_2 melt. *Chemical Papers*. 2013;67(10):1350-1354. <https://doi.org/10.2478/s11696-013-0393-x>.
11. Khokhlov V. A. On the classification of molten salt electrolytes. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010;96-104. <https://doi.org/10.1134/S0036029510020047>.
12. Tarcy G. P., Tørklep K. Current efficiency in prebake and Søderberg cells. In: Bearne G., Dupuis M., Tarcy G. (eds.). *Essential Readings in Light Metals: Aluminum Reduction Technology*. Vol. 2. Cham: Springer; 2013, p. 211-216. <https://doi.org/10.1002/9781118647851.ch30>.
13. Khramov A. P., Shurov N. I. Modern views on the composition of anionic oxy-fluoride complexes of aluminium and their rearrangement during the electrolysis of cryolite-alumina melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014;2014:581-592. <https://doi.org/10.1134/S0036029514080059>.
14. Kirik S. D., Zaitseva Yu. N., Leshok D. Yu., Samoilov A. S., Dubinin P. S., Yakimov I. S., et al. NaF-KF- AlF_3 system: phase transition in $\text{K}_2\text{NaAl}_3\text{F}_{12}$ ternary fluoride. *Inorganic Chemistry*. 2015;54(12):5960-5969. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5b00772>.
15. Samoilov A. S., Zaitseva Yu. N., Dubinin P. S., Piksina O. E., Ruzhnikov S. G., Yakimov I. S., et al. Structural aspects of the formation of solid solutions in the NaF-KF- AlF_3 system. *Journal of Solid State Chemistry*. 2017;252:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.04.037>.

16. Padamata S. K., Yasinskiy A. S., Polyakov P. V. Progress of inert anodes in aluminium industry: review. *Journal Siberian Federal University. Chemistry*. 2018;11(1):18-30. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055>.
17. Wang Jun-qing, Li Chang-lin, Chai Deng-peng, Zhou Yun-feng, Fang Bin, Li Qiang. Relationship between aluminium electrolysis current efficiency and operating condition in electrolyte containing high concentration of Li and K. In: Martin O. (eds.). *Light metals*. Cham: Springer; 2018, p. 621-626. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_80.
18. Korenko M., Vaskova Z., Šimko F., Šimurda M., Ambrova M., Shi Zhong-ning. Electrical conductivity and viscosity of cryolite electrolytes for solar grade silicon (Si-SoG) electrowinning. *Transactions Nonferrous Metals Society China*. 2014;24(12):3944-3948. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63554-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63554-8).
19. Vasyunina N. V., Vasyunina I. P., Polyakov P. V., Mihalev Yu. G. Solubility of aluminum in cryolite-alumina electrolytes. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2011;52(4):360-363. (In Russ.).
20. Vasyunina N. V., Vasyunina I. P., Mihalev Yu. G., Vinogradov A. M. Alumina solubility and dissolution rate in acidic alumina-cryolite melts. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2009;50(4):338-342. (In Russ.).
21. Pozin M. E. *Technology of mineral salts (fertilizers, pesticides, industrial salts, oxides and acids): monograph*. Part 2; 4th ed., amended. Leningrad: Chemistry; 1974, 768 p. (In Russ.).
22. Guz' S. Yu., Baranovskaya R. G. *Production of cryolite, aluminum fluoride and sodium fluoride*. Moscow: Metallurgiya; 1964, 238 p. (In Russ.).
23. Wan Bingbing, Li Wenfang, Sun Wanting, Liu Fangfang, Chen Bin, Xu Shiyao, et al. Synthesis of cryolite (Na_3AlF_6) from secondary aluminum dross generated in the aluminum recycling process. *Materials*. 2020;13(17):3871. <https://doi.org/10.3390/ma13173871>.
24. Wang Liangshi, Wang Chunmei, Yu Ying, Huang Xiaowei, Long Zhiqi, Hou Yongke, et al. Recovery of fluorine from bastnasite as synthetic cryolite by-product. *Journal of Hazardous Materials*. 2012;209-210:77-83. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.069>.
25. Chen Jie-Yuan, Lin Chih-Wei, Lin Po-Han, Li Chi-Wang, Liang Yang-Min, Liu Jhy-Chern, et al. Fluoride recovery from spent fluoride etching solution through crystallization of Na_3AlF_6 (synthetic cryolite). *Separation and Purification Technology*. 2014;137:53-58. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.019>.
26. Sattarov I. The national treasure of Tajikistan. To the 45th anniversary of the Tajik aluminum company. 2020. Available from: <https://asiaplustj.info/ru/news/tajikistan/society/20200331/natsionalnoe-dostoyanie-tadzhikistana-k-45-letiyu-tadzhikskoi-alyuminievoi-kompanii> [Accessed 23th September 2021]. (In Russ.).

Список источников

1. Altenpohl D. G. Aluminum: technology, applications and environment. A profile of a modern metal aluminum from within. 6th Edition. Tukwila: Wiley-TMS, 1998. 488 p.
2. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Dusseldorf: Aluminium Verlag, 1993. 260 p.
3. Thonstad J., Fellner P., Haarberg G. M., Hives J., Kvande H., Sterten A. Aluminium electrolysis - fundamentals of Hall-Heroult process. 3rd edition. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2001. 372 p.
4. Минцис М. Я., Поляков П. В., Сиразутдинов Г. А. Электрометаллургия алюминия: монография. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
5. Haupin W. E. Electrochemistry of the Hall-Heroult process for aluminum smelting // *Journal of Chemical Education*. 1983. Vol. 60. Iss. 4. P. 279–282. <https://doi.org/10.1021/ed060p279>.
6. Gunasegaram D. R., Molenaar D. Towards improved energy efficiency in the electrical connections of Hall-Heroult cells through finite element analysis (FEA) modeling // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 93. P. 174–192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.065>.
7. Polyakov P. V., Klyuchantsev A. B., Yasinskiy A. S., Popov Y. N. Conception of «Dream Cell» in aluminium electrolysis // *Light Metals* / eds. E. Williams. Cham: Springer, 2016. P. 283–288. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_47.
8. Asadikiya M., Yang Songge, Zhang Yifan, Lemay C., Apelian D., Zhong Yu. A review of the design of high-entropy aluminum alloys: a pathway for novel Al alloys // *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. P. 12093–12110. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06042-6>.
9. Тютрин А. А., Немчинова Н. В., Володькина А. А. Изучение влияния параметров процесса электролиза на основные технико-экономические показатели работы ванн ОА-300М // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 4. С. 906–918. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>.
10. Korenko M., Prišćák J., Šimko F. Electrical conductivity of system based on Na_3AlF_6 - SiO_2 melt // *Chemical Papers*. 2013. Vol. 67. No. 10. P. 1350–1354. <https://doi.org/10.2478/s11696-013-0393-x>.
11. Khokhlov V. A. On the classification of molten salt electrolytes // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010. P. 96–104. <https://doi.org/10.1134/S0036029510020047>.
12. Tarcy G. P., Tørklep K. Current efficiency in prebake and Søderberg cells // *Essential Readings in Light Metals: Aluminum Reduction Technology* / eds. G. Bearne, M. Dupuis, G. Tarcy. Vol. 2. Cham: Springer, 2013. P. 211–216. <https://doi.org/10.1002/9781118647851.ch30>.
13. Khramov A. P., Shurov N. I. Modern views on the composition of anionic oxy-fluoride complexes of aluminium and their rearrangement during the electrolysis of cryolite-alumina melts // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014. Vol. 2014. P. 581–592. <https://doi.org/10.1134/S0036029514080059>.

14. Kirik S. D., Zaitseva Yu. N., Leshok D. Yu., Samoilo A. S., Dubinin P. S., Yakimov I. S., et al. NaF-KF- AlF_3 system: phase transition in $\text{K}_2\text{NaAl}_3\text{F}_{12}$ ternary fluoride // *Inorganic Chemistry*. 2015. Vol. 54. No. 12. P. 5960–5969. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5b00772>.
15. Samoilo A. S., Zaitseva Yu. N., Dubinin P. S., Piksina O. E., Ruzhnikov S. G., Yakimov I. S., et al. Structural aspects of the formation of solid solutions in the NaF-KF- AlF_3 system // *Journal of Solid State Chemistry*. 2017. Vol. 252. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.04.037>.
16. Padamata S. K., Yasinskiy A. S., Polyakov P. V. Progress of inert anodes in aluminium industry: review // *Journal Siberian Federal University. Chemistry*. 2018. Vol. 11. No. 1. P. 18–30. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055>.
17. Wang Jun-qing, Li Chang-lin, Chai Deng-peng, Zhou Yun-feng, Fang Bin, Li Qiang. Relationship between aluminium electrolysis current efficiency and operating condition in electrolyte containing high concentration of Li and K // *Light metals* / eds. O. Martin. Cham: Springer, 2018. P. 621–626. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_80.
18. Korenko M., Vaskova Z., Šimko F., Šimurda M., Ambrova M., Shi Zhong-ning. Electrical conductivity and viscosity of cryolite electrolytes for solar grade silicon (Si-SoG) electrowinning // *Transactions Nonferrous Metals Society China*. 2014. Vol. 24. Iss. 12. P. 3944–3948. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63554-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63554-8).
19. Васюнина Н. В., Васюнина И. П., Поляков П. В., Михалев Ю. Г. Растворимость алюминия в криолито-глиноземных электролитах // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2011. Т. 52. № 4. С. 360–363.
20. Васюнина Н. В., Васюнина И. П., Михалев Ю. Г., Виноградов А. М. Растворимость и скорость растворе-

- ния глинозема в кислых криолитоглиноземных расплавах // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2009. Т. 50. № 4. С. 338–342.
21. Позин М. Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот): монография. Ч. 2; 4-е изд., испр. Л.: Изд-во «Химия», 1974. 768 с.
22. Гузь С. Ю., Барановская Р. Г. Производство криолита, фтористого алюминия и фтористого натрия. М.: Металлургия, 1964. 238 с.
23. Wan Bingbing, Li Wenfang, Sun Wanting, Liu Fangfang, Chen Bin, Xu Shiyao, et al. Synthesis of cryolite (Na_3AlF_6) from secondary aluminum dross generated in the aluminum recycling process // *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 17. P. 3871. <https://doi.org/10.3390/ma13173871>.
24. Wang Liangshi, Wang Chunmei, Yu Ying, Huang Xiaowei, Long Zhiqi, Hou Yongke, et al. Recovery of fluorine from bastnasite as synthetic cryolite by-product // *Journal of Hazardous Materials*. 2012. Vol. 209-210. P. 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.069>.
25. Chen Jie-Yuan, Lin Chih-Wei, Lin Po-Han, Li Chi-Wang, Liang Yang-Min, Liu Jhy-Chern, et al. Fluoride recovery from spent fluoride etching solution through crystallization of Na_3AlF_6 (synthetic cryolite) // *Separation and Purification Technology*. 2014. Vol. 137. P. 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.019>.
26. Саттаров И. Национальное достояние Таджикистана. К 45-летию Таджикской алюминиевой компании. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://asiaplustj.info/ru/news/tajikistan/society/20200331/natsionalnoe-dostoyanie-tadzhikistana-k-45-letiyu-tadzhikskoi-alyuminievoi-kompanii> (23.09.2021).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khaydar Safiev,

Dr. Sci. (Chem.), Professor,
Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan,
Director,
Scientific Research Institute of Metallurgy
JSC TALCo,
17 Kh. Khakimzade St., Dushanbe 734003, Republic of Tajikistan.

Nosir A. Naimov,

Cand. Sci. (Eng.),
Deputy Director for Research,
Scientific Research Institute of Metallurgy
JSC TALCo,
17 Kh. Khakimzade St., Dushanbe 734003, Republic of Tajikistan.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сафиев Хайдар,

доктор химических наук, профессор,
академик Национальной Академии наук
Таджикистана,
директор,
Научно-исследовательский институт металлургии
ОАО «ТАЛКо»,
734003, г. Душанбе, ул. Х. Хакимзаде, 17,
Республика Таджикистан

Наимов Носир Абдурахмонович,

кандидат технических наук,
заместитель директора по научной работе,
Научно-исследовательский институт металлургии
ОАО «ТАЛКо»,
734003, г. Душанбе, ул. Х. Хакимзаде, 17,
Республика Таджикистан

Jura R. Ruziev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Applied Chemistry,
Tajik National University,
17, Rudaki Ave., Dushanbe 734025, Republic
of Tajikistan

Ibrokhim Sh. Akhmadshoev,
Dr. PhD,
Acting Head of the Laboratory of
Environmental Research and Industrial Waste Recycling,
Research Institute of Metallurgy
JSC TALCo,
17 Kh. Khakimzade St., Dushanbe 734003, Republic of
Tajikistan.

A'zamjon M. Juraqulov,
Process Engineer,
Scientific Research Institute of Metallurgy
JSC TALCo,
17 Kh. Khakimzade St., Dushanbe 734003, Republic of
Tajikistan.

Asror Murodiyov,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Scientific Research Institute of Metallurgy
JSC TALCo,
17 Kh. Khakimzade St., Dushanbe 734003, Republic of
Tajikistan.

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

Contribution of the authors

Juraqulov A. M., Naimov N. A., Akhmadshoev I. Sh. conducted the experiments and processed data. Safiev Kh., Ruziev J. R., Murodiyov A., Nemchinova N. V. were responsible for the scientific supervision and research concept.

Conflict of interests

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

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

Information about the article

The article was submitted 03.02.2022; approved after reviewing 07.04.2022; accepted for publication 17.06.2022.

Рузиев Джура Рахимназарович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной химии,
Таджикский национальный университет,
734025, г. Душанбе, пр. Рудаки, 17,
Республика Таджикистан

Ахмадшоев Иброхим Шарифович,
доктор PhD,
исполняющий обязанности заведующего
Лабораторией
экологических исследований и переработки
промышленных отходов,
Научно-исследовательский институт металлургии
ОАО «ТАЛКо»,
734003, г. Душанбе, ул. Х. Хахимзаде, 17,
Республика Таджикистан

Джуракулов Аъзамджон Мусурмонкулович,
инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт металлургии
ОАО «ТАЛКо»,
734003, г. Душанбе, ул. Х. Хахимзаде, 17,
Республика Таджикистан

Муродиён Асрор,
доктор технических наук, доцент,
Научно-исследовательский институт металлургии
ОАО «ТАЛКо»,
734003, г. Душанбе, ул. Х. Хахимзаде, 17,
Республика Таджикистан

Немчинова Нина Владимировна,
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой металлургии цветных
металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Джуракулов А. М., Наимов Н. А. Ахмадшоев И. Ш. – проведение экспериментов и обработка данных; Сафиев Х., Рузиев Дж. Р., Муродиён А., Немчинова Н. В. – научное руководство, концепция исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена после рецензирования 07.04.2022; принята к публикации 17.06.2022.

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: **pgr@istu.edu** **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Кибер-Ленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: **pgr@istu.edu**

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Том 26, № 2. 2022 / Vol. 26, №2. 2022

16+



Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Попова, В.В. Батицкая
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.06.2022 г.
Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 26.
Тираж 500 экз. Заказ 85. Поз. плана 3н.

Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный
исследовательский технический
университет
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет»

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А