

Том 23 № 4
2019

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

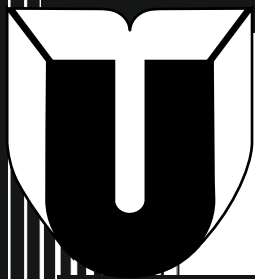
ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019



Том 23 № 4

2019

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 23 № 4

2019

Редакционная коллегия

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания –

6 раз в год

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

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

Учредитель Иркутский национальный
исследовательский технический
университет

Подписной индекс в Каталоге
русской прессы – 38237

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 4

2019

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

Editorial board

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

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

Subscription index in the Catalog
 of the Russian Press – 38237

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание 646

Машиностроение и машиноведение

- ❁ **Ахмедиев С.К., Филиппова Т.С., Михайлов В.Ф., Орынтаева Г.Ж.** Исследование динамики стержневых элементов машиностроительных конструкций..... 650
- ❁ **Брянских Т.Б., Нижегородов А.И.** Промышленные печи с механической подовой платформой. Компонентные решения..... 660
- ❁ **Бублик Д.А., Кононенко Р.В.** К вопросу контроля геометрических параметров объектов двойной кривизны больших размеров при помощи системы технического зрения.... 670
- ❁ **Губанов А.Е., Москвитин А.А., Дуюн Т.А.** Разработка методики определения составляющих силы резания при фрезеровании авиационных материалов..... 678
- ❁ **Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Елисеев А.В., Вьонг Куанг Чык.** Межпарциальные связи в механических колебательных системах с двумя степенями свободы: возможности формирования динамических состояний..... 689
- ❁ **Николаев А.Ю.** Влияние дисбаланса инструментальных наладок на качество обработанной поверхности при концевом фрезеровании..... 699
- ❁ **Сартаков В.Д.** Анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов..... 710
- ❁ **Сидорова А.В., Пономарев Б.Б.** Определение оптимального сочетания параметров управления промышленным роботом в робототехническом комплексе обработки кромок деталей..... 723
- ❁ **Солер Я.И., Дрожжин С.Н.** Выбор штамповых сталей холодного деформирования по критерию шероховатости плоских деталей при CBN-шлифовании инструментами нормальной пористости..... 731
- ❁ **Стуров А.А., Чащин Н.С.** Механообработка композиционного материала с использованием робототехнического комплекса на базе робота KUKA KR210..... 743

Энергетика

- ❁ **Стенников В.А., Пеньковский А.В., Постников И.В., Еделева О.А., Медникова Е.Е., Добровольская Т.В., Соколов П.А.** Научно-методическое обеспечение оптимального развития теплоснабжения и его практическая реализация на территории Иркутской области..... 751
- ❁ **Байшев А.В., Торопов А.С.** Эффективность использования солнечных батарей с целью снижения затрат на потребляемую электроэнергию..... 764
- ❁ **Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е., Ведяшкин М.В.** Влияние коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на механизм дробления капель различных размеров..... 775
- ❁ **Кондратьев В.В., Сысоева Т.И., Иванов Н.Н., Ершов В.А.** Разработка и испытания устройства термоэлектрического преобразования..... 787
- ❁ **Хапусов В.Г., Подкорытов А.А., Ермаков А.А.** Моделирование котельного агрегата по каналу «температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства – расход дымовых газов»..... 797

Металлургия и материаловедение

- ❁ **Евсеев Н.В., Тютрин А.А., Пастухов М.П.** Гранулирование пылевых отходов кремниевых производств для возврата в технологический процесс..... 805
- ❁ **Комарова Т.Ю., Кульчицкий А.А., Лебедев А.Б., Бажин В.Ю.** Автоматизация мониторинга и очистки от HF посредством красного шлама на участке электролизеров Содерберга 816
- ❁ **Сомов В.В., Немчинова Н.В., Бычинский В.А.** Математическое моделирование процесса гидрометаллургической переработки демонтированной угольной футеровки алюминиевых электролизеров..... 829

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 4

2019

CONTENTS

Contents.....	647
---------------	-----

Mechanical Engineering and Machine Science

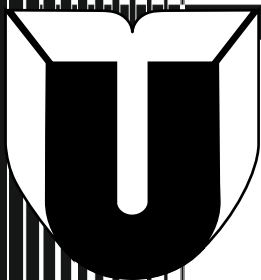
☒ Akhmediev S.K., Filippova T.S., Mikhailov V.F., Oryntaeva G.Zh. Studying dynamics of machine-building structure rod elements.....	650
☒ Bryanskikh T.B., Nizhegorodov A.I. Industrial furnaces with mechanical hearth platform. Layout solutions.....	660
☒ Bublik D.A., Kononenko R.V. To control of geometrical parameters of large size double curvature objects using computer vision system.....	670
☒ Gubanov A.E., Moskvitin A.A., Duyun T.A. Development of methods for cutting force components determination when milling aviation materials.....	678
☒ Eliseev S.V., Kuznetsov N.K., Eliseev A.V., Vuong Quang Truc. Interpartial connections in mechanical oscillatory systems with two degrees of freedom: possibilities for dynamic condition formation.....	689
☒ Nikolaev A.Yu. Effect of tool setup imbalance on machined surface quality at end milling.....	699
☒ Sartakov V.D. Analysis of interpolator modeling methods for CNC system of metal cutting machines and industrial robots.....	710
☒ Sidorova A.V., Ponomarev B.B. Determination of optimal combination of industrial robot control parameters in a part edge processing robotic complex.....	723
☒ Soler Ya.I., Drozhzhin S.N. Selection of cold rolled die steels by the roughness criterion of flat parts at CBN-grinding by normal porosity tools.....	731
☒ Sturov A.A., Chashchin N.S. Machining composite material by a robotic complex based on KUKAKR210 robot.....	743

Power Engineering

☒ Stennikov V.A., Penkovskiy A.V., Postnikov I.V., Edeleva O.A., Mednikova E.E., Dobrovolskaya T.V., Sokolov P.A. Scientific and methodological support of heat supply optimal development and its practical implementation in the Irkutsk region.....	751
☒ Baishev A.V., Toropov A.S. Efficiency of using solar panels for consumed electricity cost reduction.....	764
☒ Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Gubin V.E., Vedyashkin M.V. Influence of slurry fuel surface tension coefficient on the mechanism of crushing droplets of various sizes.....	775
☒ Kondratiev V.V., Sysoeva T.I., Ivanov N.N., Ershov V.A. Development and testing of thermoelectric conversion device.....	787
☒ Khapusov V.G., Podkorytov A.A., Ermakov A.A. Boiler unit modeling by the channel "flue gas temperature in the furnace rotary chamber– flue gas flow".....	797

Metallurgy and Materials Science

☒ Evseev N.V., Tyutrin A.A., Pastukhov M.P. Granulation of silicone production dust waste for recycling.....	805
☒ Komarova T.Yu., Kulchitsky A.A., Lebedev A.B., Bazhin V.Yu. Automation of monitoring and flue gas purification from HF by red mud on Søderberg cell site.....	816
☒ Somov V.V., Nemchinova N.V., Bychinskii V.A. Mathematical modeling of hydrometallurgical processing of dismantled carbon pot lining of aluminum reduction cells...	829



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Уважаемые читатели!

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

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

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

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

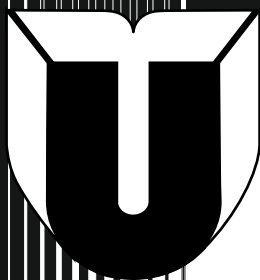
Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

Машиностроение и
машиноведение

Энергетика

Металлургия и
материаловедение

Редколлегия



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Dear Readers!

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

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

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

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

Mechanical Engineering
and Machine Science

Power Engineering

Metallurgy and
Materials Science

Editorial Board





Оригинальная статья / Original article

УДК 624.074.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-650-659>

Исследование динамики стержневых элементов машиностроительных конструкций

© С.К. Ахмедиев, Т.С. Филиппова, В.Ф. Михайлов, Г.Ж. Орынтаева

Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

Резюме: Цель – исследование динамических процессов консольных стержней с несколькими степенями свободы на основе точного аналитического метода сил. Исходная стержневая система с двумя динамическими степенями свободы на основе соответствующих матричных операций приводится к упрощенной системе уравнений с одной степенью свободы, что значительно снижает объем и трудоемкость вычислительных операций. В качестве внешнего воздействия принята гармоническая вибрационная нагрузка, моделирующая действие неуравновешенных вращающихся масс. При расчете на свободные колебания (на основе теории собственных чисел и векторов) получены выражения для круговых частот собственных колебаний, а также построены собственные формы колебаний в виде «стоячих» волн. При расчете на вынужденные колебания получены числовые значения динамических перемещений масс (при различных соотношениях круговых частот вынужденных и свободных колебаний). Все расчеты выполнены с помощью электронно-вычислительных машин, по результатам которых построены зависимости динамических перемещений с учетом соотношений частот при изменении параметров времени. Установлено, что при увеличении соотношения между частотами период вынужденных колебаний монотонно падает, а амплитуды колебаний масс остаются достаточно стабильными. Предлагаемые в данном исследовании аналитические зависимости найдут широкое применение при решении динамических задач для стержневых систем, применяемых в машиностроении, строительстве, авиастроении, судостроении.

Ключевые слова: динамические процессы, свободные и вынужденные колебания, частоты колебаний, метод сил, упругость пружин, матричные операции

Информация о статье: Дата поступления 07 мая 2019 г.; дата принятия к печати 30 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Ахмедиев С.К., Филиппова Т.С., Михайлов В.Ф., Орынтаева Г.Ж. Исследование динамики стержневых элементов машиностроительных конструкций. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):650–659 DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-650-659

Studying dynamics of machine-building structure rod elements

Serik K. Akhmediev, Tatiana S. Filippova, Valentin F. Mikhailov, Gulzhaukhar Zh. Oryntaeva

Karaganda State Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

Abstract: The purpose of the work is to study the dynamic processes of cantilever rods with several degrees of freedom on the basis of an accurate analytical method of forces. On the basis of corresponding matrix operations the initial rod system with two dynamic degrees of freedom is reduced to a simplified system of equations with a single degree of freedom. This significantly reduces the volume and complexity of computational operations. A harmonic vibration load simulating the action of unbalanced rotating masses is taken as an external influence. The calculation of free oscillations on the basis of the theory of eigenvalues and vectors has allowed to obtain the expressions for circular frequencies of natural oscillations as well as to build the eigenforms of oscillations in the shape of “standing” waves. The calculation of constrained oscillations has resulted in receiving the numerical values of mass dynamic movements under different ratios of the circular frequencies of constrained and free oscillations. It has been found that the period of constrained oscillations decreases monotonically with the increase of the frequency ratio while the amplitudes of mass oscillations remain sufficiently stable. The analytical dependences proposed in this study will find wide application in solving rod system dynamic problems in mechanical and civil engineering, aircraft construction and shipbuilding.

Keywords: dynamic processes, natural and constrained oscillations, oscillation frequencies, force method, spring elasticity, matrix operations

Information about the article: Received May 07, 2019; accepted for publication June 30, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Akhmediev S.K., Filippova T.S., Mikhailov V.F., Oryntaeva G.Zh. Studying dynamics of machine-building structure rod elements. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):650–659. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-650-659

1. ВВЕДЕНИЕ

Конструктивные элементы различных машин представляют собой стержневые системы:

- элементы для несущих рам ходовых частей различного автотранспорта;
- конструкции каркаса фюзеляжа летательных аппаратов;
- конструкции кораблей и судов;
- элементы машин.

Наряду со статическими расчетами стержневых систем на прочность, жесткость и устойчивость необходимо выполнять и динамические расчеты от внешних нагрузок, когда они изменяют свою величину или положение в сравнительно короткий промежуток времени. В этом случае массы элементов машиностроительных конструкций в процессе деформирования получают ускорения, которые создают дополнительные силы инерции, что приводит к возникновению колебаний.

Из множества видов динамических воздействий рассмотрим действие периодических нагрузок, вызываемых эксцентриситетом вращающихся частей машин (неуравновешенные вращающиеся массы). В

этом случае при гармонических нагрузках возникают периодические колебания [1].

В реальности стержневые элементы машин являются системами с распределенными по их длине массами, т.е. системами с бесконечным числом степеней свободы. Однако, представляя заданную конструкцию в виде совокупности сосредоточенных (точечных) масс, ее расчет можно свести к системе с несколькими (или с одной) степенями свободы, что значительно снижает математические сложности и трудоемкость расчетов, сохраняя при этом достаточную инженерную точность полученных результатов.

В машиностроении, строительстве, авиастроении и кораблестроении¹⁻⁶ [2–7] многие отечественные ученые занимались вопросами динамического расчета (по основным направлениям):

- определение динамических нагрузок и воздействий;
- расчет несущих конструкций на действие периодической нагрузки от машины;
- расчет конструкций на импульсивные нагрузки;
- расчет сооружений на действие ветровых нагрузок;

¹Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический / под ред. А.А. Уманского. Кн. 2. М.: Стройиздат, 1972. 609 с. / Calculation and theoretical handbook of the designer of industrial, residential and public buildings and structures. / under edition of A.A. Umansky. Book 2. M.: Stroyizdat, 1972. 609 p.

²Киселев В.А. Строительная механика: спец. курс. Динамика и устойчивость сооружений: учебник для вузов. Изд. 3-е, испр., и доп. М.: Стройиздат, 1980. 616 с. / Kiselev V.A. Structural mechanics: A specialized course. Dynamics and sustainability of structures: A textbook for universities. 3d edition, revised and enlarged. M.: Stroyizdat, 1980. 616 p.

³Ржаницын А.Р. Строительная механика: учеб. пособие для строит. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1982. 400 с. / Rzhantsyn A.R. Structural mechanics: Learning aids for building specialties of universities. M.: Higher School, 1982. 400 p.

⁴Клейн Г.К., Рекач В.Г., Розенблат Г.Н. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики (основы теории устойчивости, динамически сооружений и расчета пространственных систем): учеб. пособие по курсу строительной механики для студентов строительных высших учебных заведений по специальности «Промышленное и гражданское строительство». М.: Высшая школа, 1972. 320 с. / Klein G.K., Rekach V.G., Rosenblat G.N. Guide to practical exercises on the course of structural mechanics (the basics of the theory of stability, dynamic structures and calculation of spatial systems): Learning aids on the course of Structural Mechanics for students of Construction higher educational institutions on the specialty Industrial and Civil Engineering. M.: Higher school, 1972. 320p.

⁵Инструкция по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки. Разраб., утв. Научно-исследовательским институтом в области теории сооружений, строительных конструкций им. В.А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1970. 289 с. / Guidelines on the calculation of bearing structures of industrial buildings and structures for dynamic loads. Developed and approved by the Research Institute in the field of the Theory of Structures, Building Structures named after V.A. Kucherenko. M.: Stroyizdat, 1970. 288 p.

⁶Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1986. 607 с. / Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. Structural mechanics: textbook for universities. M.: Vysshaya Shkola, 1986. 607 p.



- расчет на действие сейсмических нагрузок;
- виброизоляция и другие меры борьбы с вибрациями;
- нормирование усталостных напряжений.

Таким образом, стержневые системы в ходе эксплуатации воспринимают динамические нагрузки, что вызвано ветровым, сейсмическим или техногенным воздействием. Поэтому развитие методов расчета динамики стержневых систем является актуальной научно-технической задачей.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования является изучение динамических процессов (свободных и вынужденных колебаний) в стержневых системах с несколькими стержнями свободы без учета сил сопротивления движению масс (незатухающие колебания) на действие вибрационной гармонической нагрузки, создаваемой неуравновешенными частями электродвигателей, насосов и других аппаратов или воздействие профиля дорожного полотна на ходовые части автотранспорта при их неравномерном движении [8]. А также разработка расчетной методики, позволяющей свести исходную динамическую систему с несколькими (в нашем случае с двумя) степенями свободы к эквивалентной системе уравнений с одной степенью свободы, что значительно облегчит решение исходных

дифференциальных уравнений свободных и вынужденных колебаний стержневых систем² [2].

Объектом исследования является консольный стержень с двумя сосредоточенными точечными массами, представляющий систему с двумя степенями свободы (рис. 1, а).

На стержень действует поперечная сосредоточенная вибрационная нагрузка

$$P(t) = P \sin \theta t, \quad (1)$$

где P – амплитуда вибрационной нагрузки; θ – круговая частота вынужденных колебаний (частота возмущающей силы); t – параметр времени.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научной основой для данного исследования являются разработанные отечественными учеными методики динамического расчета стержневых систем¹⁻⁴ [1–3], которые реализованы на конкретной конструкции (см. рис. 1 а) [9, 10].

Данная задача решена точным аналитическим методом сил² [2], при котором исходная динамическая система сводится на « n » раз больше к статически неопределимой системе (n – число степеней свободы) с помощью наложения дополнительных условных связей в виде пружин. Упругая

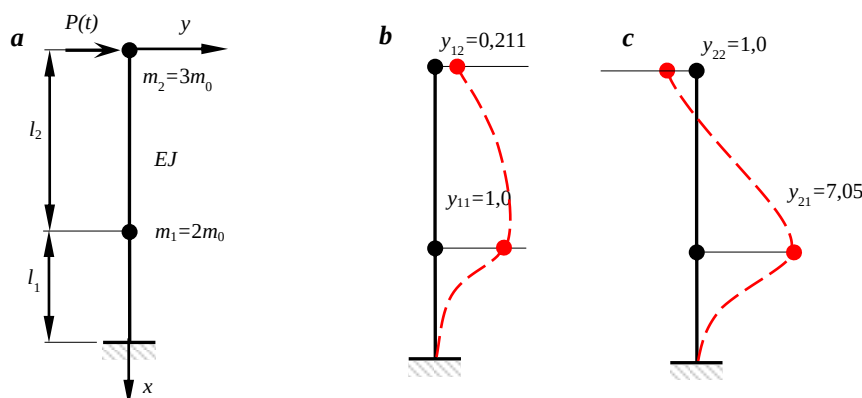


Рис. 1. Расчетная схема исследуемого объекта (а) и формы собственных колебаний (b, c)
Fig. 1. Calculation model of the studied object (a) and shapes of eigen oscillations (b, c)

характеристика условных пружин подчиняется следующему закону (без учета затухания):

$$C_k Y_k(t) = J_k^* = m_k \ddot{Y}_k(t), \quad (2)$$

где C_k – упругость пружины (дополнительной наложенной связи); J_k^* – сила инерции k -й массы; m_k – k -я точечная масса; $Y_k(t)$ – динамические перемещения k -й массы; $\ddot{Y}_k(t)$ – ее ускорение; $k = 1, 2, \dots, n$.

В нашем случае при $n = 2$ исходные дифференциальные уравнения колебаний (без учета затухания колебаний) будут выглядеть следующим образом^{2,3,6} [2, 3]:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} m_1 \ddot{Y}_1(t) + \delta_{12} m_2 \ddot{Y}_2(t) + Y_1(t) &= \delta_{11} \cdot 0 + \delta_{12} P(t) \\ \delta_{21} m_1 \ddot{Y}_1(t) + \delta_{22} m_2 \ddot{Y}_2(t) + Y_2(t) &= \delta_{21} \cdot 0 + \delta_{22} P(t) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где δ_{ij} ($i = 1, 2; j = 1, 2$) – единичные коэффициенты метода сил для динамических расчетов⁴.

В матричной форме уравнение (3) запишем так:

$$B M \ddot{y}(t) + \ddot{y}(t) = B \vec{P}. \quad (4)$$

Представим элементы выражения

(4) в развернутом виде:

$$M = m_0 \bar{M} = m_0 \begin{vmatrix} \bar{m}_1 & 0 \\ 0 & \bar{m}_2 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где M – диагональная матрица масс ($\bar{m}_1 = \frac{m_1}{m_0} = 2, 0; \bar{m}_2 = \frac{m_2}{m_0} = 3, 0$),

$$B = \delta_0 \bar{B} = \delta_0 \begin{vmatrix} \bar{\delta}_{11} & \bar{\delta}_{21} \\ \bar{\delta}_{12} & \bar{\delta}_{22} \end{vmatrix} \quad (6)$$

– матрица единичных коэффициентов

$$(\bar{\delta}_{11} = \frac{\delta_{11}}{\delta_0}; \bar{\delta}_{11} = \bar{\delta}_{21} = \frac{\delta_{12}}{\delta_0};$$

$$\bar{\delta}_{22} = \frac{\delta_{22}}{\delta_0}; \delta_0 = 1/EJ)$$

Для определения единичных коэффициентов метода сил (δ_{ij}) для стержня (см. рис. 1) строим единичные эпюры моментов $\bar{M}_1, \bar{M}_2$ от соответствующих единичных сил инерции $J_1^* = J_2^* = 1, 0$ [11], показанные на рис. 2.

Коэффициенты вычисляем по формуле Мора с использованием правила Верещагина^{4,6}:

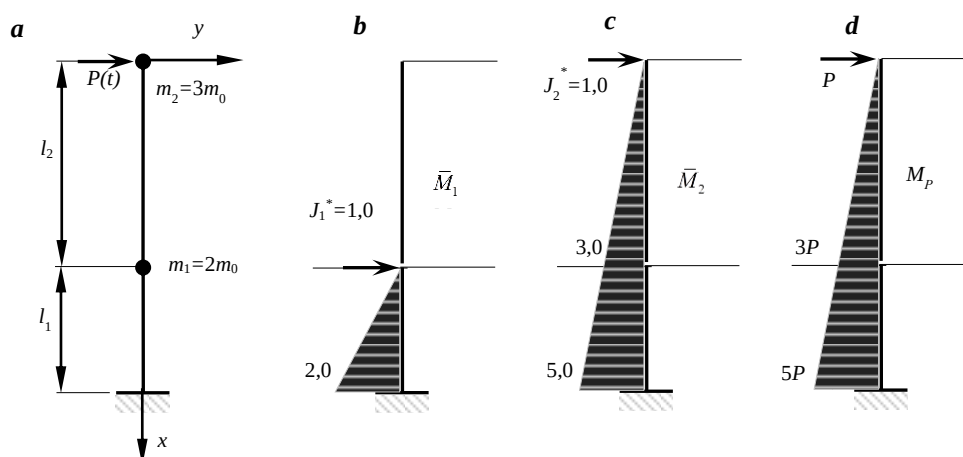


Рис. 2. Единичные $\bar{M}_1, \bar{M}_2$ и грузовая M_p эпюры моментов

Fig. 2. Unit moment curves $\bar{M}_1, \bar{M}_2$ and a load moment curve M_p



$$\begin{aligned}\delta_{11} &= \frac{1}{EJ} (\bar{M}_1)(\bar{M}_1) = \frac{2,67}{EJ}; \\ \delta_{22} &= \frac{1}{EJ} (\bar{M}_2)(\bar{M}_2) = \frac{41,67}{EJ}; \\ \delta_{12} = \delta_{21} &= \frac{1}{EJ} (\bar{M}_1)(\bar{M}_2) = \frac{8,67}{EJ}.\end{aligned}\quad (7)$$

По (6), с учетом (7), имеем

$$B = \frac{1}{EJ} \begin{vmatrix} 2,67 & 8,67 \\ 8,67 & 41,67 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

По (5), с учетом (7), получим

$$M = m_0 \begin{vmatrix} 2,0 & 0 \\ 0 & 3,0 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где $(\delta_0 m_0 = \frac{m_0}{EJ})$.

Выполним матричную операцию (перемножение квадратных матриц)

$$\bar{B}\bar{M} = \begin{vmatrix} 5,34 & 26,02 \\ 17,34 & 125,01 \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Вычислим собственные числа матрицы (10), составляя по [2] определитель

$$\det(\bar{B}\bar{M} - \lambda E) = 0, \quad (11)$$

где λ – собственное число матрицы.

По (11) имеем:

$$\det \begin{vmatrix} (5,34 - \lambda) & 26,02 \\ 17,34 & (125,01 - \lambda) \end{vmatrix} = 0. \quad (12)$$

Раскрывая делитель (12), получаем характеристическое уравнение 2-го порядка:

$$\lambda^2 - 130,35\lambda + 216,54 = 0. \quad (13)$$

Решая квадратное уравнение (13), получаем два его действительных корня:

$$\lambda_1 = 128,6321; \lambda_2 = 1,6479. \quad (14)$$

По значениям (14) определим матрицу собственных векторов:

$$\bar{Y} = \begin{vmatrix} y_{11} & y_{21} \\ y_{12} & y_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1,0 & -7,0448 \\ 0,211 & 1,0 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

По значениям ординат матрицы (15) строим формы собственных (главных) колебаний в виде «стоячих» волн (см. рис. 1 б, с) [12].

На основе полученных положений расчета выражений (4)–(15) разработаем методику приведения исходной динамической задачи с двумя степенями свободы (рис. 1) к двум эквивалентным динамическим уравнениям с одной степенью свободы, что существенно снизит объемы и трудоемкость математических расчетов.

Для этого перенормируем матрицу собственных форм (15) в виде

$$\bar{Y}^T \cdot \bar{M} \bar{Y} = E, \quad (16)$$

где E – единичная матрица.

По (16) имеем

$$\begin{aligned}\bar{Y}^T \cdot \bar{M} \bar{Y} &= \begin{vmatrix} 1,0 & y_{12} \\ y_{22} & 1,0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \bar{m}_1 & 0 \\ 0 & \bar{m}_2 \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & y_{21} \\ y_{12} & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2,134 & 0 \\ 0 & 102,45 \end{vmatrix}.\end{aligned}\quad (17)$$

Нормируем вектор (15) в виде

$$\begin{aligned}\bar{Y} &= \begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{\bar{m}_1 + \bar{m}_2 y_{12}^2}} & \frac{y_{21}}{\sqrt{\bar{m}_2 + \bar{m}_1 y_{21}^2}} \\ \frac{y_{12}}{\sqrt{\bar{m}_1 + \bar{m}_2 y_{12}^2}} & \frac{1}{\sqrt{\bar{m}_2 + \bar{m}_1 y_{21}^2}} \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} 0,6845 & -0,06965 \\ 0,1444 & 0,0988 \end{vmatrix}.\end{aligned}\quad (18)$$

Вернемся к уравнению (4), перейдя к новому виду перемещений

$$\bar{y}(t) = \bar{y}z(t); \quad \ddot{\bar{y}}(t) = \bar{y}\ddot{z}(t). \quad (19)$$

Тогда с учетом (19) уравнение (4) примет иной вид:

$$\bar{B} \bar{M} \ddot{\bar{y}}(t) + \frac{1}{m_0 \delta_0} \bar{y}(t) = \frac{1}{m_0} \bar{B} \bar{P}(t), \quad (20)$$

где m_0, δ_0 – масштабные (условные) значения соответственно массы и единичного перемещения.

Подставляя выражение (19) в уравнение (20), получим

$$\bar{B} \bar{M} \ddot{\bar{z}}(t) + \frac{1}{\delta_0 m_0} \bar{y} \bar{z}(t) = \frac{1}{m_0} \bar{B} \bar{P}(t). \quad (21)$$

Запишем это уравнение через собственные числа (14):

$$\Lambda = \begin{vmatrix} \lambda_2 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{vmatrix}. \quad (22)$$

Тогда с учетом (22) уравнение (21) примет вид

$$\begin{aligned} \Lambda \ddot{\bar{z}}(t) + \frac{1}{\delta_0 m_0} \bar{z}(t) = \\ = \frac{1}{m_0} \bar{y}^T \cdot \bar{M} \bar{B} \cdot \bar{P}(t). \end{aligned} \quad (23)$$

Таким образом, уравнение в форме (23) позволяет свести динамическую задачу с несколькими степенями свободы к системе уравнений с одной степенью свободы.

В нашем примере по (22) уравнению имеем следующее:

$$\Lambda = \begin{vmatrix} 128,6321 & 0 \\ 0 & 1,6479 \end{vmatrix}. \quad (24)$$

Для правой части (уравнение (23)) получим (см. рис. 1) следующее:

$$\bar{P}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ P(t) \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Тогда система уравнений (23), с учетом выражений (24 и 25), примет следующий вид:

$$\begin{cases} 128,6321 \cdot \ddot{z}_1(t) + \frac{EJ}{m_0} z_1(t) = \frac{1}{m_0} [35,8552 P(t)] \\ 1,6479 \cdot \ddot{z}_2(t) + \frac{EJ}{m_0} z_2(t) = \frac{1}{m_0} [-5,765 P(t)] \end{cases}. \quad (26)$$

Уравнения (26) решаются независимо друг от друга (например, с помощью интеграла Дюамеля) [13].

После решения уравнений (26) действительные поперечные перемещения масс (см. рис. 2) находят (с учетом выражения (19)) по данной формуле:

$$\bar{y}(t) = \bar{y} \cdot \bar{z}(t). \quad (27)$$

Для нашего примера (см. рис. 1) получим

$$\begin{vmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,6845 & -0,6965 \\ 0,1444 & 0,0988 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{vmatrix}. \quad (28)$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По предложенной методике расчета, на основе вышеизложенных теоретических исследований, решена точным аналитическим методом задача динамического расчета консольного стержня (см. рис. 1) на действие вибрационной гармонической нагрузки $P(t) = P \sin \theta t$ (без затухания колебаний). Все матричные операции и решение динамических уравнений (26) выполнены с помощью электронно-вычислительных машин (ЭВМ) при следующих исходных данных:

$$EJ = 63 \cdot 10^{10} \text{ Нм}^2; \quad P = 448 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$\theta / \omega_1 = 0,1; 0,5; 1,0; 1,2;$$

$$m_0 = 4,48 \cdot 10^4 \text{ кг}; \quad \omega_1 = 3,3075 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_2 = 2,89 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1},$$

где ω_1, ω_2 – круговые частоты свободных колебаний.



При этом получены следующие числовые результаты (в частности величины динамических мер перемещений $z_1(t)$, $z_2(t)$, $y_1(t)$, $y_2(t)$ в зависимости от параметра времени $t = 0 \div 0,2$ с, с шагом 0,05 с (при $\theta / \omega = 0,1$).

Подобные аналитические зависимости можно получить и при других соотношениях $\theta / \omega = 0,5; 1,5; 2,0$ (здесь они не приведены).

Аналитические дифференциальные уравнения метода сил (26) решены на ЭВМ численным методом Рунге–Кутты 4-го порядка при следующих начальных условиях: $t = 0$; $z(0) = 0$; $\dot{z}(t) = 0$.

Анализ рис. 3–6 показывает следующие зависимости по динамическим перемещениям вынужденных колебаний.

1. С увеличением соотношения (θ / ω_1) периоды вынужденных колебаний, соответственно, уменьшаются.

2. Для всех соотношений (θ / ω_1)

амплитуда перемещений вынужденных колебаний изменяется в пределах величин $(\pm 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м} \div \pm 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм})$.

3. При возрастании соотношения (θ / ω_1) величины амплитуд масс, соответственно, возрастают (до $\theta / \omega_1 = 1,0$) – явление резонанса, а далее монотонно уменьшаются (см. рис. 6), т.е. очевидна яркая картина резонансного процесса.

4. Данные указанных рисунков могут служить основанием для расчетов консольного стержня на жесткость и техническую проверку воздействия вибрационной нагрузки, на допустимые по безопасности перемещения людей и измерительные приборы.

5. Достоверность полученных результатов доказана апробированными ранее теоретическими результатами динамических расчетов сооружений, разработанными отечественными учеными¹⁻⁶ [2–5, 14].

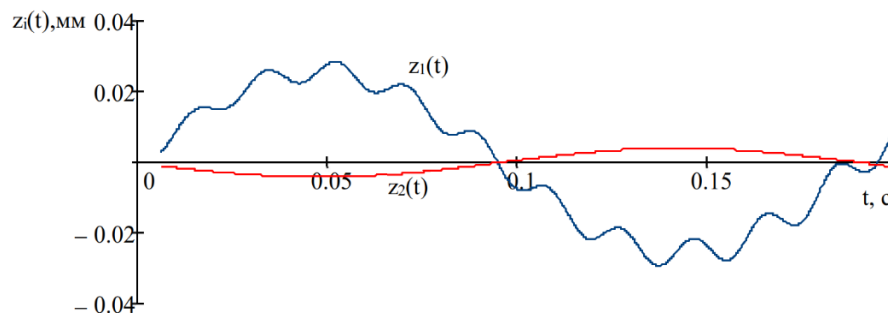


Рис. 3. Зависимости $z_1(t)$, $z_2(t)$ при $\theta / \omega_1 = 0,1$

Fig. 3. Functions $z_1(t)$, $z_2(t)$ when $\theta / \omega_1 = 0.1$

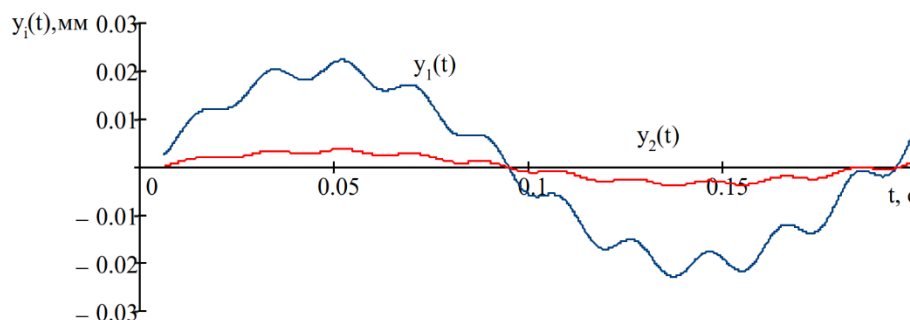


Рис. 4. Зависимости $y_1(t)$, $y_2(t)$ при $\theta / \omega_1 = 0,1$

Fig. 4. Functions $y_1(t)$, $y_2(t)$ when $\theta / \omega_1 = 0.1$

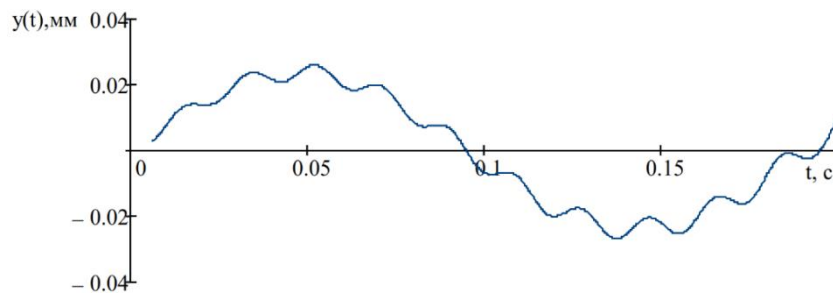


Рис. 5. Зависимость $[y = y_1(t) + y_2(t)]$ при $\theta / \omega_1 = 0,1$

Fig. 5. Function $[y = y_1(t) + y_2(t)]$ when $\theta / \omega_1 = 0.1$

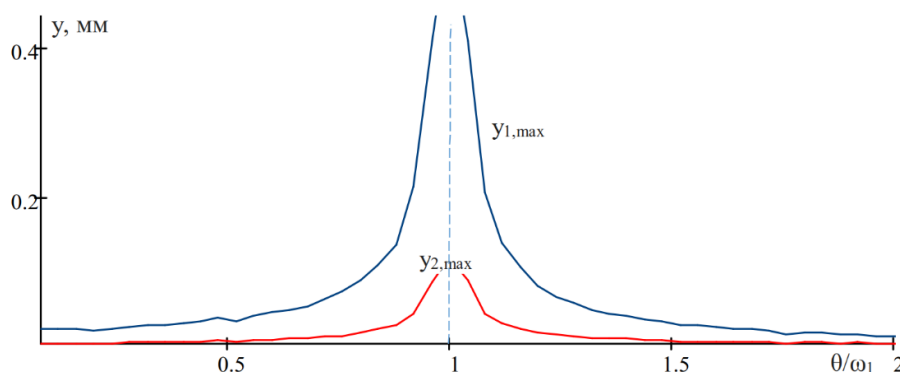


Рис. 6. Зависимости $y_1(t), y_2(t)$ от соотношения θ / ω_1

Fig. 6. Functions $y_1(t), y_2(t)$ from the ratio θ / ω_1

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе выполнены исследования динамических процессов консольного стержня с двумя сосредоточенными точечными массами (см. рис. 1) – системы с двумя динамическими степенями свободы.

2. Разработана научная методика приведения исходной динамической системы с двумя степенями свободы к упрощенной системе с одной степенью свободы на основе соответствующих матричных операций.

3. В результате исследования получены соответствующие разрешающие уравнения для решения задачи вынужденных колебаний консольного стержня при действии гармонической вибрационной нагрузки $P(t) = P \sin \theta t$. С помощью ЭВМ исследовано влияние соотношений между частотами (θ / ω_1) на величину динамических перемещений (см. рис. 3–6); установ-

лено, что с возрастанием частоты возмущающей силы период вынужденных колебаний уменьшается, при этом амплитуды динамических перемещений существенно меняются. При возрастании соотношения (θ / ω_1) (см. рис. 6) амплитуды масс вначале монотонно возрастают, а затем монотонно уменьшаются; наблюдается характерное влияние явления резонанса (при $\theta / \omega_1 = 1,0$).

4. Достоверность полученных результатов обуславливается апробированием теоретических положений работы, в которой используются исследования отечественных ученых.

5. Полученные в данной работе теоретические и практические результаты найдут достаточно широкое применение в научных исследованиях и в практике проектирования различных динамических стержневых систем (в машиностроении, строительстве, транспорте).



Библиографический список

1. Gerber Yu.A., Danilov M.N., Sebeshev V.G. Probabilistic analysis and reliability evaluation of the harmonically loaded rod systems with dynamic vibration dampers, based on the use of modern software complexes // IOP Conference Series: materials Science and Engineering (Novosibirsk, 01 July 2018). Novosibirsk, 2018. Vol. 456(1), p. 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012042
2. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лашеников Б.Я., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. М.: Стройиздат, 1984. 415 с.
3. Искрицкий Д.Е. Строительная механика элементов машин. Л.: Судостроение, 1970. 448 с.
4. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. М.: Машгиз, 1957. 338 с.
5. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1970. 734 с.
6. Чернов Ю.Т. Вибрации строительных конструкций. М.: АСВ, 2006. 288 с.
7. Филиппова Т.С., Ахмедиев С.К. Теоретические основы динамики и устойчивости механических систем. Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. 224 с.
8. Braccesi C., Cianetti F., Palmieri M., Zucca G. The importance of dynamic behaviour of vibrating systems on the response in case of non-Gaussian random excitations // Procedia Structural Integrity. 2018. Vol. 12. P. 224–238. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.092
9. Gridnev S., Skalko Y., Ravodin I., Yanaeva V. Simulation of vibrations of a continuously elastic supported rod with varying boundary conditions under the action of a movable // MATEC Web of Conferences (Rostov-on-Don, 17 September 2018). Rostov-on-Don, 2018. Vol. 196. P. 01053. DOI: 10.1051/mateconf/201819601053
10. Pišteš V., Kucera P., Nozhenko O., Kravchenko K., Svída D. An unconventional rubber torsional vibration damper with two degrees of freedom // Vibroengineering Procedia. 2017. Vol. 13. P. 136–141. DOI: 10.21595/vp.2017.19042
11. Hein R.A. Discrete-Continuous Method of Mechanical System Modelling // Polish Maritime Research. 2017. Vol. 24(s1). P. 97–107. DOI: 10.1515/pomr-2017-0027
12. Asgari M. Vibration interaction analysis of non-uniform cross-section beam structure under a moving vehicle // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2016. Vol. 21(4). P. 429–439. DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4437
13. Gumus E., Ertas A. Analysis of free pendulum vibration absorber using flexible multi-body dynamics // Shock and Vibration. 2016. P. 3253178. DOI: 10.1155/2016/3253178
14. Rossikhin, Yu.A., Shitikova, M.V. Problem on impact interaction of elastic rod with Ufland-Mindlin plate // Prikladnaya Mekhanika. 1993. Vol. 29 (2). P. 39–46.

References

1. Gerber Yu.A., Danilov M.N., Sebeshev V.G. Probabilistic analysis and reliability evaluation of the harmonically loaded rod systems with dynamic vibration dampers, based on the use of modern software complexes. IOP Conference Series: materials Science and Engineering [Novosibirsk, 1 July 2018]. Novosibirsk, 2018, vol. 456 (1), p. 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012042
2. Smirnov A.F., Aleksandrov A.V., Lashchenikov B.Ya., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika. Dinamika i ustojchivost' sooruzhenij* [Structural mechanics. Dynamics and stability of structures.]. Moscow: Strojizdat Publ., 1984, 415 p. (In Russ.).
3. Iskrickij D.E. *Stroitel'naya mekhanika elementov mashin* [Structural mechanics of machine elements]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1970, 448 p. (In Russ.).
4. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoj teorii uprugih kolebanij* [Fundamentals of the applied theory of elastic vibrations]. Moscow: Mashgiz Publ., 1957, 338 p. (In Russ.).
5. Filippov A.P. *Kolebaniya deformiruemyyh system* [Deformable system oscillations]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970, 734 p. (In Russ.).
6. Chernov Yu.T. *Vibracii stroitel'nykh konstrukcij* [Building structure vibrations]. Moscow: ASV Publ., 2006, 288 p. (In Russ.).
7. Filippova T.S., Ahmediev S.K. *Teoreticheskie osnovy dinamiki i ustojchivosti mehanicheskikh system* [Theoretical foundations of mechanical system dynamics and stability]. Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. 224 с.
8. Braccesi C., Cianetti F., Palmieri M., Zucca G. The importance of dynamic behaviour of vibrating systems on the response in case of non-Gaussian random excitations. *Procedia Structural Integrity*, 2018, vol. 12, pp. 224–238. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.092
9. Gridnev S., Skalko Y., Ravodin I., Yanaeva V. Simulation of vibrations of a continuously elastic supported rod with varying boundary conditions under the action of a movable. *MATEC Web of Conferences* (Rostov-on-Don, 17 September 2018). Rostov-on-Don, 2018, vol. 196, p. 01053. DOI: 10.1051/mateconf/201819601053
10. Pišteš V., Kucera P., Nozhenko O., Kravchenko K., Svída D. An unconventional rubber torsional vibration damper with two degrees of freedom. *Vibroengineering Procedia*, 2017, vol. 13, pp. 136–141. DOI: 10.21595/vp.2017.19042
11. Hein R.A. Discrete-Continuous Method of Mechanical System Modelling. *Polish Maritime Research*, 2017, vol. 24 (s1), pp. 97–107. DOI: 10.1515/pomr-2017-0027

12. Asgari M. Vibration interaction analysis of non-uniform cross-section beam structure under a moving vehicle. *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 2016, vol. 21 (4), pp. 429–439. DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4437

13. Gumus E., Ertas A. Analysis of free pendulum vibration absorber using flexible multi-body dynamics. *Shock*

and Vibration, 2016, p. 3253178. DOI: 10.1155/2016/3253178

14. Rossikhin, Yu.A., Shitikova, M.V. Problem on impact interaction of elastic rod with Ufland-Mindlin plate. *Prikladnaya Mekhanika* [Applied Mechanics], 1993, vol. 29(2), pp. 39–46.

Критерии авторства

Ахмедиев С.К., Филиппова Т.С., Михайлов В.Ф., Орынтаева Г.Ж. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Akhmediev S.K., Filippova T.S., Mikhailov V.F., Oryntaeva G.Zh. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахмедиев Серик Кабултаевич,

кандидат технических наук,
профессор кафедры механики,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда, Бульвар Мира, 56,
Республика Казахстан;
✉ e-mail: mskate2014@mail.ru

Serik K. Akhmediev,

Cand. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Mechanics,
Karaganda State Technical University,
56 Mira Blvd., Karaganda 100027,
Republic of Kazakhstan;
✉ e-mail: mskate2014@mail.ru

Филиппова Татьяна Силиньевна,

кандидат технических наук,
профессор кафедры механики,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда, Бульвар Мира, 56,
Республика Казахстан;
e-mail: confucius_kstu@mail.ru

Tatiana S. Filippova,

Cand. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Mechanics,
Karaganda State Technical University,
56 Mira Blvd., Karaganda 100027,
Republic of Kazakhstan;
e-mail: confucius_kstu@mail.ru

Михайлов Валентин Феликсович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры механики,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда, Бульвар Мира, 56,
Республика Казахстан;
e-mail: mehkrig@mail.ru

Valentin F. Mikhailov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Mechanics,
Karaganda State Technical University,
56 Mira Blvd., Karaganda 100027,
Republic of Kazakhstan;
e-mail: mehkrig@mail.ru

Орынтаева Гульжаухар Жунусхановна,

старший преподаватель кафедры механики,
Карагандинский государственный
технический университет,
100027, г. Караганда, Бульвар Мира, 56,
Республика Казахстан;
e-mail: oryntaeva70@mail.ru

Gulzhaukhar Zh. Oryntaeva,

Senior Lecturer of the Department of Mechanics,
Karaganda State Technical University,
56 Mira Blvd., Karaganda 100027,
Republic of Kazakhstan;
e-mail: oryntaeva70@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 62-65; 67.05; 62.868

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-660-669>

Промышленные печи с механической подовой платформой. Компоновочные решения

© Т.Б. Брянских, А.И. Нижегородов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – разработка и анализ компоновочных решений промышленных электрических печей различной производительности на основе типоразмерного ряда унифицированных модульных блоков. Рассмотрен метод конструкторской компоновки различных вариантов промышленных электрических печей для термообработки сыпучих материалов. В результате проведенной работы (на основании ранее разработанного типоразмерного ряда электрических модульных блоков) получены конструкторские компоновки электрических промышленных печей с механической подовой платформой. Работа выполнена с учетом ранее выявленных экспериментальных данных при исследовании физической модели печного агрегата. Печи с продольной и вертикальной компоновкой при необходимости увеличения производительности могут быть смонтированы по так называемой «лепестковой» схеме с применением модульных блоков третьего типоразмера и обеспечивать производительность $13,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ при удельной энергоёмкости (по вермикулиту) – $48...52 \text{ МДж/м}^3$.

Ключевые слова: модульный блок, типоразмерный ряд, механическая подовая платформа, продольная компоновка, лепестковая компоновка, вертикальная компоновка

Информация о статье: Дата поступления 07 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 20 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Брянских Т.Б., Нижегородов А.И. Промышленные печи с механической подовой платформой. Компоновочные решения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. 2019;23(4):660–669 DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-660-669

Industrial furnaces with mechanical hearth platform. Layout solutions

Tatiana B. Bryanskikh, Anatoly I. Nizhegorodov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is development and analysis of design layouts of industrial electric furnaces of various capacities based on a standard size range of unified modular units. The paper considers the method of design layout of various versions of industrial electric furnaces intended for heat treatment of bulk materials. As a result of the work carried out on the basis of the previously developed standard size range of electric modular units the design layouts of electric industrial furnaces with a mechanical hearth platform have been obtained. The work takes into account the experimental data previously received in the study of the physical model of the furnace unit. When it is required to increase the performance the furnaces with longitudinal and vertical layouts can be mounted according to the flap layout with the application of modular units of the third size. The furnaces ensure the productive capacity of $13.5 \text{ m}^3/\text{h}$ at the specific energy intensity (by vermiculite) of $48...52 \text{ MJ/m}^3$.

Keywords: modular unit, standard size range, mechanical hearth platform, longitudinal layout, flap layout, vertical layout

Information about the article: Received February 07, 2019; accepted for publication June 20, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Bryanskikh T.B., Nizhegorodov A.I. Industrial furnaces with mechanical hearth platform. Layout solutions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):660–669. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-660-669

1. ВВЕДЕНИЕ

Вспученный вермикулит уже более семидесяти лет используется при произ-

водстве почти двухсот видов промышленной продукции. Благодаря своим исключительным тепло- и термоизоляционными свойствам [1–6] он находит применение в

строительстве, в производстве огнеупоров, является эффективным пористым наполнителем для легких бетонов, из него готовят сухие смеси, в том числе огнезащитные, применяют для звукоизоляции помещений, используют при разливке стали, в качестве адсорбента дыма и ядовитых газов, как противорадиационный материал [7–9] и т.д.

В России около двадцати месторождений вермикулитовых руд [3, 10], но в разработке находится только три: Потанинское, Татарское и Кокшаровское. Из-за отсутствия эффективного энерготехнологического оборудования переработка, применение вермикулита и производство изделий из него в нашей стране не развиты, а там, где работают вермикулитовые цеха, все еще используются устаревшие огневые печи [7].

В начале 2000-х годов появилась первая электропечь, постоянное совершенствование которой в 2015 г. привело к радикальному изменению, новой концепции – печи с механической подовой платформой для термообработки сыпучих материалов, которая во время испытаний при обжиге вермикулита Кокшаровского месторождения показала значение удельной энергоемкости 48–52 мДж/м³. После исправления выявленных недостатков и доработки конструкции был предложен типоразмерный ряд из трех одномодульных блоков, представленный в работе [11–14], созданный для различных компоновочных решений при проектировании таких агрегатов.

Первый типоразмер модуля был выполнен с использованием данных, полученных при экспериментальных исследованиях, проведенных на физической модели, изготовленной в масштабе 1:1 – на опытном образце модуля с механической подовой платформой. Основные размеры, производительность, потребляемая мощность, количество, размеры нагревательных элементов и другие характеристики модуля были взяты с опытного образца, и уже на их основе производились расчеты для двух других типоразмеров.

Теперь, с учетом последних технических решений, заложенных в одно-

дульный блок, стала возможным разработка промышленных электропечей с механической подовой платформой.

Цель настоящей работы состоит в разработке электрических печей различной компоновки и производительности, относящихся к данному типу агрегатов (на основе трех типоразмеров модульных блоков).

2. УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С ПРОДОЛЬНОЙ КОМПОНОВКОЙ

Электрическая печь на основе трех одномодульных блоков [11], в данном случае для обжига вермикулитовых концентратов, показана на рис. 1 (вид сбоку и сверху). Она содержит раму 1 с опорами 2 и регулируемые опоры 3, снабженными винтами для выставления печи в горизонтальное положение. На раме на роликах с округлыми ребрами 4 установлена механическая подовая платформа 5, подпружиненная слева цилиндрическими пружинами 6 с регулировочными винтами 7, а с правой стороны установлен специальный нелинейный упругий элемент 8, устройство которого рассмотрено в предшествующей работе [11]. Платформа 5 через другую цилиндрическую пружину 9 и плунжер 10, размещенный в цилиндре 11, связана с эксцентриком 12, посаженным на вал электродвигателя, регулируемого по скорости вращения частотным регулятором (на рис. 1 не показан).

На механической платформе закреплены пустотелые рамные балки модульных блоков 13, 14 и 15, промежутки между которыми (и пространство внутри них) заполнены термоизоляционным материалом 16 (муллитокремнеземистым войлоком). Крышки модулей также заполнены изолирующим материалом для уменьшения потерь тепловой энергии.

На рамах закреплены подовые плиты 17, выполненные из жаростойкой стали.

На раме печи установлены панели 18, а на них закреплены головки 19 с параллельными гранями, удерживающие



электронагреватели 20, соединенные последовательно в единую цепь. По длине нагревателей расположены фиксаторы (на рис. 1 условно не показаны, см. [11]) для обеспечения постоянного зазора между ними и подовыми плитами.

Нагреватели каждого из модульных блоков подключены к одной фазе трехфазной электросети через тиристорный регулятор, обеспечивающий возможность изменения температуры их нагрева в пределах 850...940°C.

На подовой платформе 5 закреплены вертикальные лотки 21, плотно присоединенные к модульным блокам справа. На торцевых частях модулей слева установлены термоизолирующие панели 22, а на них (параллельно основаниям подовых плит) закреплены лотки 23 с двумя параллельными стенками, параллельными поверхностям подовых плит, рис. 1 и 2.

Рядом с лотками 23 на раме печи установлены дозировочные бункеры 24, которые имеют прорези и вертикальные заслонки 25, регулирующие высоту откоса вермикулитового концентрата, высыпаю-

щегося из прорезей бункеров 24 на горизонтальные пластины 26, входящие своими концами в пространство между параллельными (верхней и нижней) стенками соответствующих лотков 23.

Верхняя и нижняя поверхности верхней стенки каждого лотка выполнены с направленной в сторону модулей насечкой, рис. 2. Такова новая дозировочная система.

Перед запуском печи рама 1 с помощью регулируемых опор 3 устанавливается в горизонтальное положение (см. рис. 1). Нагреватели подключаются к электросети и прогреваются в течение 15...18 мин, а затем запускают эксцентриковый привод, и плунжер 10 начинает возвратно-поступательное движение в своем цилиндре с амплитудой, равной величине эксцентриситета. Плунжер сжимает пружину 9 и через нее возбуждает колебания общей механической подовой платформы. Частота и амплитуда этих колебаний регулируются при изменении угловой скорости ω – вращения вала приводного двигателя, с помощью которого платформа может

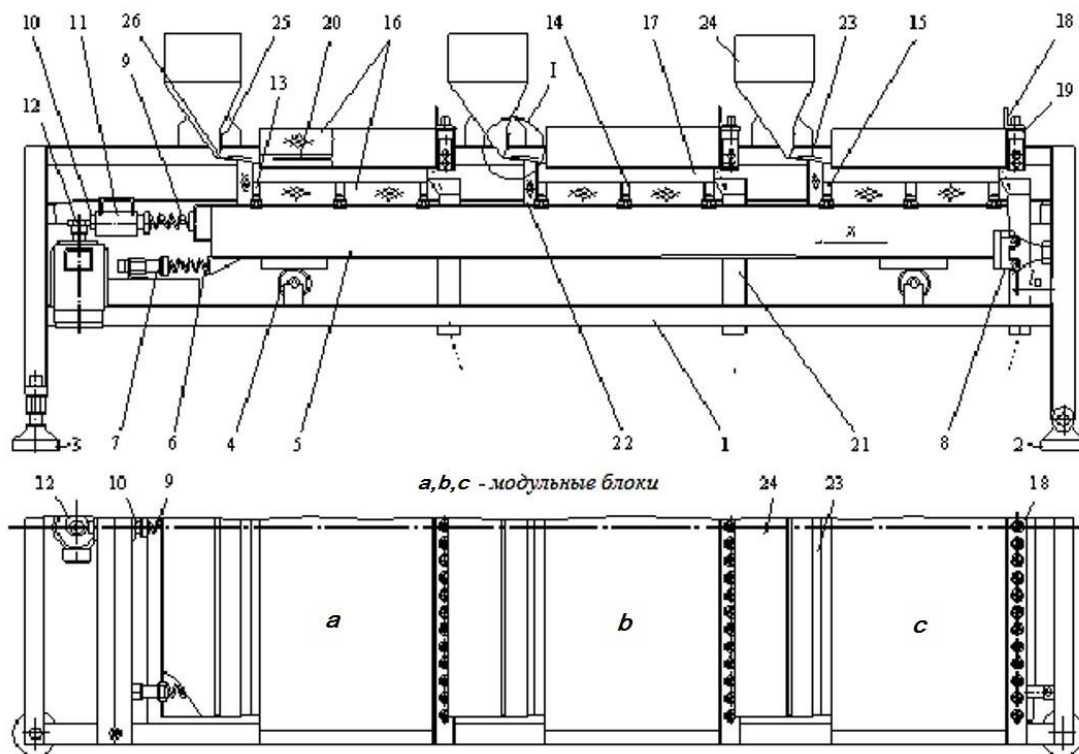


Рис. 1. Продольная электрическая печь с механической подовой платформой
Fig. 1. Longitudinal electric furnace with a mechanical hearth platform

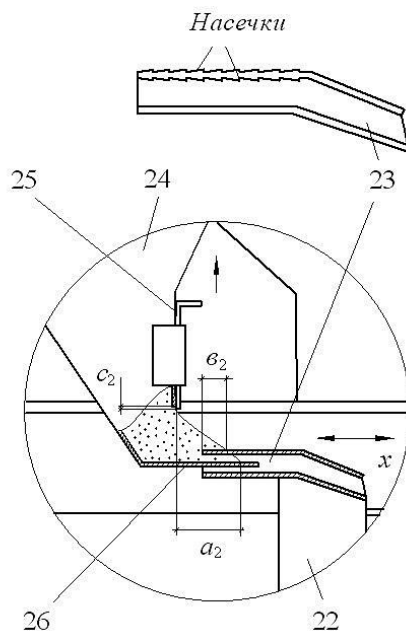


Рис. 2. Дозировочная система печи
Fig. 2. Furnace batching system

вводиться в резонансный режим или частично отводиться от него, это зависит от степени близости частоты ω (рад/с) возвратно-поступательного движения плунжера 10 и собственной частоты колебаний платформы с подовыми плитами.

Собственная частота колебаний платформы ω_0 определяется по формуле [11]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2cx_0 + c_1x_0 + 14,4 \frac{D^2 EJ_z}{l_0^4}}{Mx_0}}, \quad (1)$$

где M – общая масса всех подвижных элементов на платформе 5, кг; c – жесткость пружин 6, Н/м; c_0 – жесткость пружины 9 (см. рис. 1); x_0 – статическое смещение платформы (по примеру испытаний опытного образца можно принимать 0,002–0,004 м); D – диаметр роликов нелинейного элемента 8, м; E – модуль упругости стали, Н/м²; J_z – осевой момент инерции поперечного сечения упругих пластин нелинейного элемента, м⁴; l_0 – расстояние от крепления

до точки контакта роликов и пластин упругого нелинейного элемента 8 в положении статического равновесия платформы, рис. 1 [11].

Амплитуда колебаний платформы в резонансном режиме, когда среднее значение l_0 в формуле (1) возрастает, приводит к уменьшению собственной частоты, что свойственно колебательным системам с односторонней нелинейной упругой связью¹. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такой системы приведена на рис. 3.

При повышении частоты возбуждения ω вхождение в резонанс происходит в т. 1, когда ω сравнивается с ω_0 . Система «перепрыгивает» на более высокий энергетический уровень, соответствующий т. 2 АЧХ при той же частоте, но с большей амплитудой. После этого колебательная система находится на пологой ветви АЧХ, и можно настраивать амплитуду платформы путем изменения частоты вращения эксцентрикового вала в сторону уменьшения или увеличения ω в диапазоне от т. 4 до т. 5 (т. 3 на резонансном пике неустойчива).

¹Вибрации в технике: справочник: в 6 т. Колебания нелинейных механических систем / под ред. И.И. Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. Т. 2. 351 с. / *Vibrations in engineering equipment: reference book: in 6 volumes. Oscillations of nonlinear mechanical systems / under edition of I.I. Blekhman. M.: Mashinostroyeniye, 1979, vol. 2, 351 p.*

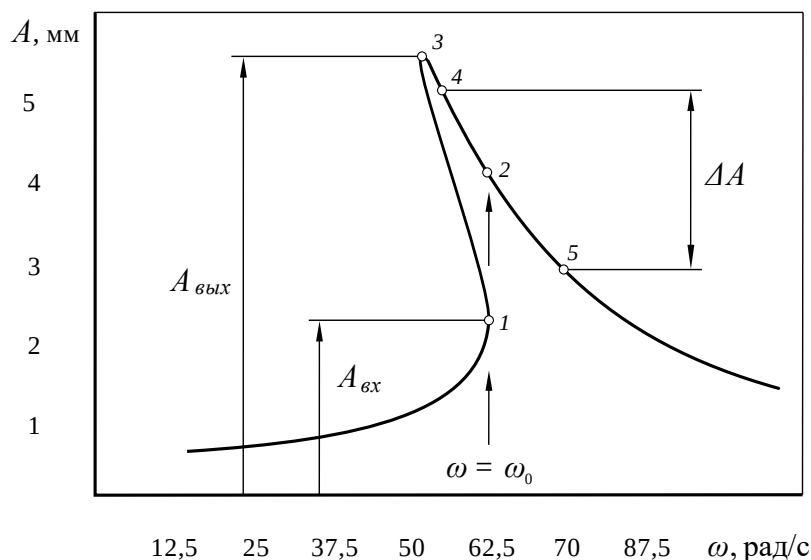


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика механической подовой платформы
Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic of the mechanical hearth platform

Колебательные системы с заваленным влево резонансным пиком совершают несимметричные колебания¹, вызывающие вибротранспортный эффект, использование которого для создания движения сыпучей среды требует создания определенного режима колебаний механической платформы печи. При экстремумах виброускорения $\pm \ddot{x}_{\max}$ силы инерции частиц вермикулита Φ_q определяются выражением

$$\Phi_q = m\ddot{x}_2 \quad (2)$$

и должны превышать удерживающие их на поверхности подовых плит силы трения

$$F_T = mgf, \quad (3)$$

где m – масса частицы, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; f – коэффициент сухого трения вермикулита по стали [13]. Только тогда частицы войдут в режим движения по подовым плитам, и такие режимы установлены при исследовании на физической модели.

Рассмотренная конструкция печи наиболее проста с точки зрения компоновки и более всего соответствует третьему, самому широкому типоразмеру модульного блока, т.к. в этом случае ширина и длина агрегата практически сравняются. При этом

минимальная производительность такой печи будет равна $4,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ [11].

Ее главный недостаток – это динамическая неуравновешенность, т.к. все три подовые плиты с подрамниками монтируются на общей механической платформе, то общая масса подвижной части будет не менее 500 кг. Инерционные нагрузки от подовой платформы потребуют установки печи на массивный фундамент.

3. ДРУГИЕ КОМПОНОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

Для модульных блоков первого и второго типоразмеров возможна компактная комплектация промышленной печи по так называемой лепестковой схеме, рис. 4 (вид сверху).

Печь содержит общую раму 1, на которой смонтировано три модуля, размещенных под крышками 2. Модули оборудованы панелями 3 для установки на них крепежных головок общим эксцентриковым приводом с цилиндрическими пружинами, цилиндром, плунжером (на рис. 4 не видны, т.к. находятся под бункером сырья) и нелинейными упругими элементами 4.

Дозирующая система в данной печи такая же, как и в рассмотренном агрегате продольной компоновки. На виде сверху прослеживаются только ее горизонтальные пластины 5 и сам бункер 6, а также эле-

менты привода подовых платформ – электродвигатель 7 и клиноременная передача 8, соединенная с эксцентриковым валом, тоже размещенным под бункером.

Лепестковая компоновка с конструктивной точки зрения немного сложнее, но из-за разворота модульных блоков на 120° результирующая сила инерции подовых плит здесь значительно меньше, чем в печи с продольной компоновкой.

Если пренебречь нелинейными искажениями из-за упругих элементов 4, то силы инерции подовых платформ можно примерно рассчитать по формулам²:

$$\Phi_1 = MA\omega^2 \cos \omega t; \quad (4)$$

$$\Phi_2 = MA\omega^2 \cos (\omega t + 2,093); \quad (5)$$

$$\Phi_3 = MA\omega^2 \cos (\omega t + 4,186), \quad (6)$$

где M – масса механических подовых платформ модульных блоков, кг; A – амплитуда колебаний, м; ω – угловая частота

эксцентрикового вала, рад/с.

Если $\omega t = 0$, то силы инерции каждой из платформ будут равны:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -MA\omega^2; \quad \Phi_2 = +0,5 MA\omega^2; \\ \Phi_3 &= +0,5 MA\omega^2, \end{aligned} \quad (A)$$

а равнодействующая определится выражением:

$$R = MA\omega^2 (-1 + 0,5 \cos 60^\circ + 0,5 \cos 60^\circ) = -0,5 MA\omega^2. \quad (B)$$

Если $\omega t = 45^\circ$, то равенства (A) и (B) изменятся:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -0,707 MA\omega^2; \\ \Phi_2 &= +0,97 MA\omega^2; \quad \Phi_3 = -0,259 MA\omega^2; \end{aligned}$$

$$R = MA\omega^2 (-0,707 + 0,97 \cos 60^\circ - 0,259 \cos 60^\circ) = -0,352 MA\omega^2.$$

Очевидно, что и при других значениях текущей фазы ωt равнодействующая R

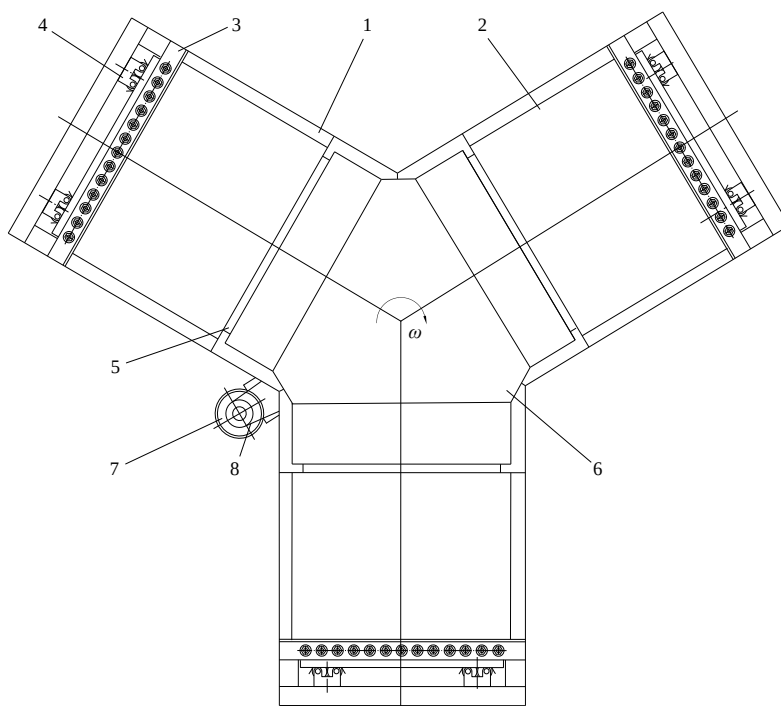


Рис. 4. Компоновка печи по лепестковой схеме
Fig. 4. Flap layout of the furnace

²Вибрации в технике: справочник: в 6 т. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. Т. 4. 509 с. / Vibrations in engineering equipment: reference book: in 6 volumes. Vibration processes and machines / under edition of E.E. Lavendel. M.: Mashinostroyeniye, 1981, vol. 4, 509 p.



будет всегда меньше наибольшей из сил инерции, но полной балансировки все же нет. Ее можно достигнуть, если на приводном валу выполнить три эксцентрика с их относительным разворотом 120° , тогда будут реализованы синфазные колебания всех подовых платформ с равнодействующей силой инерции равной нулю.

При этом минимальная производительность такой печи с модульными блоками второго типоразмера будет равна $3,45 \text{ м}^3/\text{ч}$ [11].

Кроме лепестковой печи есть агрегат с вертикальной компоновкой, в котором модульные блоки (как в электрических модульно-спусковых печах) расположены один над другим. Для такой компоновки подходят модульные блоки с механической

подовой платформой первого и второго типоразмеров: третий типоразмер слишком широкий.

На рис. 5 показана схема промышленной печи из трех модулей. Она выполнена в виде закрытого металлического шкафа (на рис. 5 стенки и створки условно сняты); содержит раму 1, подовые плиты 2, термокрышки модульных блоков 3 с размещенными под ними электрическими нагревателями 4. Подовые плиты, установленные на роликах с ребордами 5, подпружинены слева цилиндрическими пружинами 6 и нелинейными упругими элементами 7, расположенными справа. Привод состоит из моторредуктора 8, общего вала 9 с эксцентриками 10, подшипников 11, цилиндров 12 с плунжерами 13, и пружинами 14.

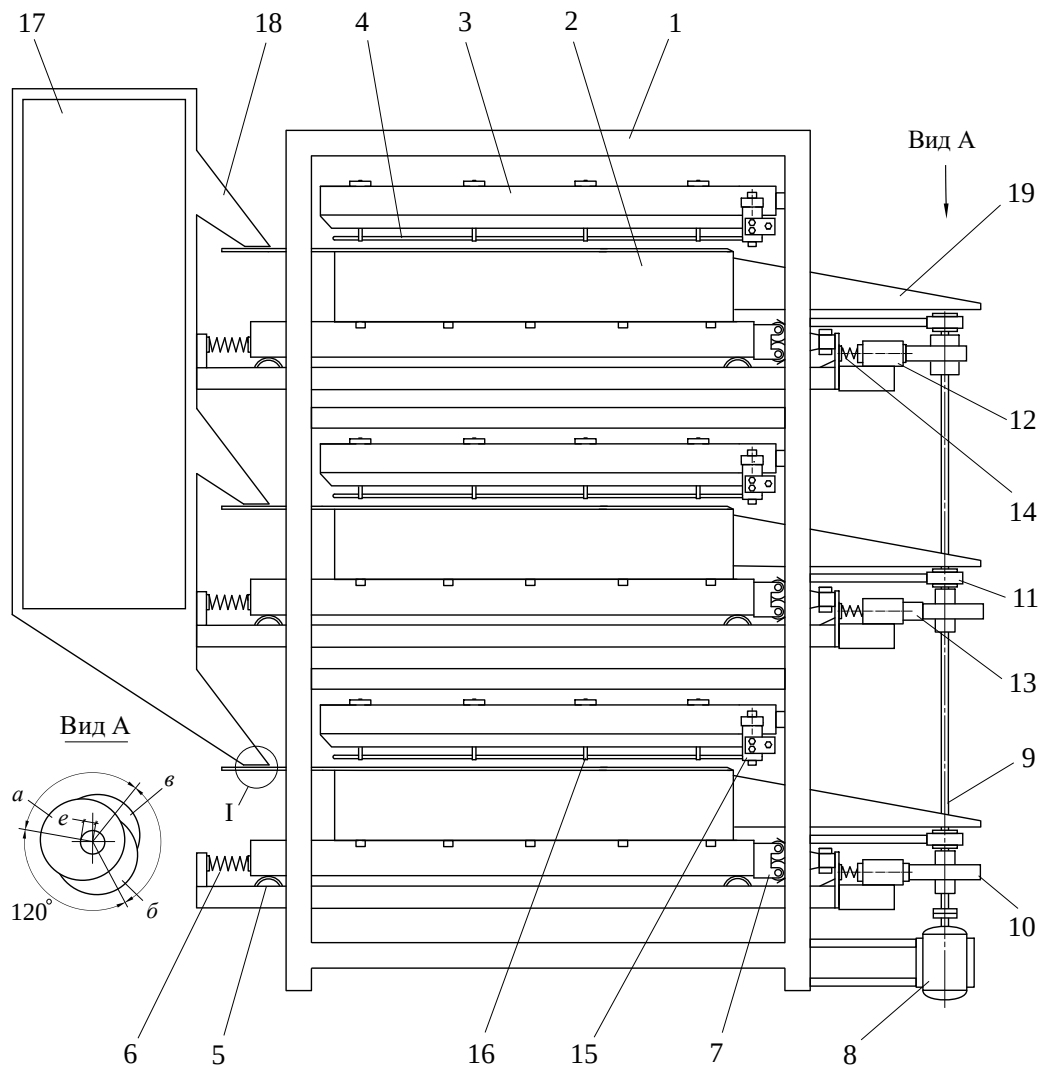


Рис. 5. Печь вертикальной компоновки
Fig. 5. Vertical furnace

Крепежные головки 15 вместе с фиксаторами 16 удерживают электрические нагреватели с заданным зазором над поверхностью подовых плит.

Дозирование вермикулитового концентрата здесь осуществляется из общего бункера 17 через лотки 18 с помощью самих подовых плит за счет несимметрии их колебаний и рифленной поверхности в зоне «I» с насечкой, направленной в сторону модулей.

Концентрат, двигаясь по поверхности пода, поступает в обжиговую зону под нагревателями 4 и вспучивается за 2,8...3,5 с, в итоге на выходе из лотков 19 имеем вспученный продукт, поступающий на конвейер для отвода в систему охлаждения.

Производительность такой печи будет составлять 2,1 м³/ч с модульными блоками первого типоразмера и 3,45 м³/ч с блоками второго типоразмера [11].

Виброускорение механических подовых платформ примерно равно

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \sin \omega t, \quad (7)$$

оно может вызывать значительные силы инерции – $M\ddot{x}$. А при вертикальной компоновке они могут раскачивать печь, поэтому наиболее рациональным может стать сдвоенный симметричный агрегат, при этом каждый из них размещен слева и справа от бункера сырья 17, см. рис. 5. Тогда будет достигнута и максимальная производительность от 4,2 м³/ч (с модулями первого типоразмера) до 6,9 м³/ч (с модулями второго типоразмера).

Чтобы понизить инерционные нагрузки, вибропривод печи должен иметь единый вал с тремя эксцентриками a , b и c

(вид А на рис. 5), посаженными на него с разворотом в 120°.

Кроме того, при этом расположении эксцентриков пульсация крутящего момента на валу приводного двигателя, а также пульсация угловой скорости (и частоты возбуждения) ω существенно снижаются.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные варианты не исчерпывают все возможные компоновки промышленных печей с механической подовой платформой для термообработки сыпучих материалов, а при необходимости увеличения производительности печи с продольной и вертикальной компоновкой могут быть смонтированы по лепестковой схеме, а также, применяя модульные блоки третьего типоразмера [11], можно получить производительность в 13,5 м³/ч. При непрерывной круглосуточной работе месячная выработка при производстве вспученного вермикулита может достигать 10000 м³. А по той причине, что получение вермикулита и изделий на его основе – это сфера деятельности малых предприятий, то такой производительности будет вполне достаточно.

В отличие от огневых печей, работающих на углеводородном топливе, новые электрические печи пожаро- и взрывобезопасны, экологически чистые (не выделяют продуктов горения), но главное их преимущество в том, что они характеризуются малой удельной энергоемкостью – 48...52 мДж/м³ против 259...267 мДж/м³ у огневых печей. Поэтому они имеют хорошую перспективу в эксплуатации и усовершенствовании.

Библиографический список

1. Ахтямов Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов // Огнеупоры и техническая керамика. 2009. № 1-2. С. 59–64.
2. Вермикулит (производство и применение): сб. науч. трудов. Челябинск: УралНИИ-стройпроект, 1988. 175 с.
3. Арутюнов В.В., Чайков Б.М. Конъюнктура минерального сырья. М.: ВИЭМС, 1992. 112 с.
4. Fan Ding, Manglai Gao, Jie Wang, Tao Shen, Weili Zang. Tuning wettability by controlling the layer charge and structure of organo-vermiculites // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2018. Vol. 57. P. 304–312. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.08.037
5. Stawinski, W., Freitas, O., Chmielarz, L., Wegrzyn, A., Komadera, K., Błachowski, A., Figueiredo S. The influence of acid treatments over vermiculite based material as adsorbent for cationic textile dyestuffs //



Chemosphere. 2016. Vol. 153. P. 115–129. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.03.004

6. Fuks L., Herdzik-Koniecko I. Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low and medium-level radioactive waste repositories // *Applied Clay Science*. 2018. Vol. 161. P. 139–150. DOI: 10.1016/j.clay.2018.04.010

7. Производство и применение вермикулита / под ред. Н.А. Попова. М.: Стройиздат, 1964. 128 с.

8. Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 94. P. 186–192. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.090

9. Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 179. P. 302–306. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219

10. Роснедра. Кокшаровское вермикулитовое ме-

сторожение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rosnedra.gov.ru/article/2132.html> (дата обращения: 25.07. 2016).

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

12. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И. Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности. М.: Физматлит. 2002. 416 с.

13. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. М.: Высшая школа, 1977. С. 255.

14. Тимошенко С.П., Донован Х.Я., Янг У.У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение. 1985. 472 с.

References

1. Ahtyamov R.Ya. Vermiculite - a Raw Material for Making Heat-Insulating Refractories. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Industrial Ceramics], 2009, no. 1-2, pp. 59–64. (In Russ.).

2. *Vermikulit (proizvodstvo i primeneniye): sbornik nauchnykh trudov* [Vermiculite (production and use): Collected scientific works.] Chelyabinsk: UralNII Stroioproekt Publ., 1988, 175 p. (In Russ.).

3. Arutyunov V.V., Chajkov B.M. *Kon'yunktura mineral'nogo syr'ya* [Market of mineral raw materials]. Moscow: VIEMS Publ., 1992, 112 p. (In Russ.).

4. Fan Ding, Manglai Gao, Jie Wang, Tao Shen, Weili Zang. Tuning wettability by controlling the layer charge and structure of organo-vermiculites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, vol. 57, pp. 304–312. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.08.037

5. Stawinski, W., Freitas, O., Chmielarz, L., Wegrzyn, A., Komadera, K., Blachowski, A., Figueiredo S. The influence of acid treatments over vermiculite based material as ad-sorbent for cationic textile dyestuffs. *Chemosphere*, 2016, vol. 153, pp. 115–129. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.03.004

6. Fuks L., Herdzik-Koniecko I. Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low and medium-level radioactive waste repositories. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 161, pp. 139–150. DOI: 10.1016/j.clay.2018.04.010

7. *Proizvodstvo i primeneniye vermiculita* [Production and use of vermiculite] / under edition of N.A. Popov. Moscow: Strojizdat Publ., 1964, 128 p. (In Russ.).

8. Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydrox-

ide. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 186–192. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.090

9. Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 179, pp. 302–306. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219

10. *Rosnedra. Koksharovskoe vermiculitovoe mestorozhdenie* [Federal Agency on Subsoil Use. Koksharovskoye vermiculite deposit]. Available at: <http://www.rosnedra.gov.ru/article/2132.html> (accessed 25 July 2016).

11. Bryanskikh T.B., Nizhegorodov A.I. Development of a dimension range of single modules for firing furnaces with a mechanical hearth platform. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2019, vol. 23, no. 2, pp. 214–224. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-214-224>

12. Gorshkov A.G., Starovojtov E.I., Tarlavskij D.V. *Teoriya uprugosti i plastichnosti* [Theory of Elasticity and Plasticity]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2002, 416 p. (In Russ.).

13. Bauman V.A., Byhovskij I.I. *Vibracionnye mashiny i processy v stroitel'stve* [Vibration machines and processes in construction]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1977, pp. 255. (In Russ.).

14. Timoshenko S.P., Donovan H.Ya., Yang U.U. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Fluctuations in Engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985, 472 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Брянских Т.Б., Нижегородов А.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bryanskikh T.B., Nizhegorodov A.I. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Брянских Татьяна Борисовна,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: broocha@yandex.ru

Нижегородов Анатолий Иванович,
доктор технических наук,
профессор кафедры строительных,
дорожных машин и гидравлических систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana B. Bryanskikh,
Postgraduate Student,
National Research Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: broocha@yandex.ru

Anatoly I. Nizhegorodov,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Construction,
Road Machinery and Hydraulic Systems,
National Research Irkutsk State
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 62-213

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-670-677>

К вопросу контроля геометрических параметров объектов двойной кривизны больших размеров при помощи системы технического зрения

© Д.А. Бублик, Р.В. Кононенко

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – обоснование возможного контроля геометрических параметров объектов двойной кривизны большого размера с помощью оптической сетки, накладываемой при помощи проектора и анализа получаемого изображения посредством видеокамеры и прикладного программного обеспечения. Проведено исследование различных геометрических форм оптической сетки, проецируемой на измеряемую поверхность. Разработан алгоритм формирования и наложения оптической сетки в зависимости от формы контролируемой поверхности. Изучен тип видеокамеры для снятия видеоизображения. Исследовано взаимное положение проектора и видеокамеры, выявлена взаимосвязь между положением видеокамеры и проектора, изучены различные геометрические формы оптической сетки. Дано обоснование применения различных геометрических форм оптической сетки для контроля поверхностей двойной кривизны. Выбраны оптимальные точки установки проектора и видеокамеры для снятия геометрических параметров контролируемой поверхности. На основе проведенных экспериментов было установлено, что для контроля деталей с плавной изменяющейся кривизной поверхности больше всего подходят прямоугольные сетки, а для деталей с резким изменением кривизны поверхности – сетка из многогранников. Также установлено, что точность контроля геометрических параметров поверхности зависит от разрешающей способности применяемой видеокамеры, относительного положения видеокамеры и проектора.

Ключевые слова: техническое зрение, контроль поверхностей двойной кривизны, оптический контроль

Информация о статье: Дата поступления 21 марта 2019 г.; дата принятия к печати 17 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Бублик Д.А., Кононенко Р.В. К вопросу контроля геометрических параметров объектов двойной кривизны больших размеров при помощи системы технического зрения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. 2019;23(4):670–677. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-670-677

To control of geometrical parameters of large size double curvature objects using computer vision system

Dmitrii A. Bublik, Roman V. Kononenko

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is justification of possible control of geometrical parameters of big size double curvature objects using an optical grid imposed by means of the projector and the analysis of the received image by means of a video camera and applied software. Various geometric shapes of the optical grid projected on the measured surface are studied. An algorithm of optical grid formation and superposition depending on the shape of the controlled surface is developed. The type of video camera for taking video images is studied. The mutual position of the project and the camera is investigated, the relationship between the position of the video camera and the projector is revealed and various geometric shapes of the optical grid are studied. The application of various geometrical shapes of the optical grid to control double curvature surfaces is substantiated. Optimal points for the installation of the project and the video camera to read the geometric parameters of the controlled surface are selected. Conducted experiments allowed to find out that rectangular grids are most suitable for the control of parts with a smoothly changing surface curvature, while the polyhedron grid is more suitable for the parts with the sharply changing curvature of the surface. It is also determined that the accuracy of surface geometric parameter control depends on the resolution of the video camera used and the relative position of the camera and the projector.

Keywords: computer vision, control of double curvature surfaces, optical control

Information about the article: Received March 21, 2019; accepted for publication July 17, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Bublik D.A., Kononenko R.V. To control of geometrical parameters of large size double curvature objects using computer vision system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):670–677. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-670-677

1. ВВЕДЕНИЕ

В производстве фюзеляжей современных самолетов широкое применение нашли элементы обшивки, обладающие двойной кривизной поверхности. Процесс изготовления таких деталей является довольно трудоемким и технологически сложным [1–16]. Для изготовления одного элемента обшивки с элементами двойной кривизны требуется задействовать довольно большой объем ресурсов и технологического оборудования. Из-за замысловатой геометрической формы элемента и недостаточной жесткости измерение его геометрических параметров традиционными средствами (штангенциркуль, микрометр, штангенрейсмус и т.д.) является довольно затруднительным и требует разработки оригинальной методики измерения для каждой детали. Другим способом определения геометрических параметров деталей с двойной кривизной поверхности является использование координатно-измерительных машин (КИМ) [2]. На них хорошо поддаются измерению детали малых и средних размеров, т.к. их габариты не выходят за рабочую зону КИМ. При росте объема деталей требуется увеличивать рабочую зону КИМ, что приводит к многократному увеличению цены на измерительное оборудование. С ростом габаритов КИМ снижается точность измерения и после достижения деталью определенных геометрических размеров экономическая целесообразность таких измерений снижается [3]. Фюзеляж необходимо контролировать не только после процесса изготовления, но также с целью анализа и ремонта эксплуатируемых воздушных судов, с помощью различных методов определять его текущее состояние [4], в т.ч. и цифровой корреляцией изображения [14]. Также необходимо контролировать сборку, состоящую из отдельных элементов, что, в свою очередь, требует применения особых расчетов геометрических параметров наруж-

ных поверхностей [6]. Сборка готовой модели должна соответствовать карте допуска [12].

Для контроля геометрических параметров крупногабаритных деталей двойной кривизны в настоящее время в авиационной промышленности используется метод шаблонов [5]. Из специального композитного материала на станке с числовым программным управлением изготавливается шаблон. Данный шаблон используется для проверки геометрических параметров сделанной детали. Данный метод контроля имеет ряд недостатков, а именно:

1) при большой номенклатуре производимых деталей требуются складские помещения для хранения шаблонов;

2) производство шаблонов – затратный технологический процесс;

3) измерения производятся при горизонтальном положении шаблона и детали, а поскольку они являются тонкостенными, то сила тяжести влияет на их геометрические параметры в режиме измерения;

4) транспортировка шаблонов от склада до места измерения и обратно тоже требует использования определенных ресурсов.

Также существует способ определения базирования деталей на сборочном стенде (с помощью методов секущих плоскостей), для реализации которого необходимо дорогостоящее измерительное оборудование [13].

Из вышеописанного можно сделать вывод, что существующие на данный момент технологии измерения геометрических параметров крупногабаритных деталей с поверхностями двойной кривизны не в полной мере обеспечивают предъявляемые к ним требования по скорости и точности измерений.

Целью данной работы является описание технологических возможностей измерения геометрических параметров крупногабаритных деталей с двойной кри-



визной поверхности при помощи систем технического зрения.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ «МАШИННОГО ЗРЕНИЯ» ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ

С начала 2000-х годов в машино- и авиастроении все большее применение находят системы «технического зрения» для контроля различных параметров выпускаемой продукции. Использование «машинного зрения», в отличие от традиционных способов контроля геометрических параметров деталей, позволяет за очень короткий промежуток времени (в течение 1–2 с) оценить интересующий параметр, но в отличие от традиционных методов контроля система при помощи «машинного зрения» является более сложной в настройке и обслуживании.

Для использования системы машинного зрения с целью контроля геометрических параметров деталей с двойной кривизной поверхности (рис. 1) предлагается разработать программно-аппаратный комплекс (ПАК) на основе персонального компьютера, промышленной видеокамеры и системы оптического проецирования.

В основу работы предлагаемого решения заложен представленный ниже принцип работы.

1. На основе имеющейся 3D-модели детали программный продукт, входящий в состав ПАК, генерирует плоскую сетку, состоящую из геометрических примитивов (квадраты, треугольники, окружности, многоугольники).

2. При помощи оптической системы (проектора) сгенерированная сетка проецируется на поверхность, геометрические параметры которой необходимо проконтролировать. Создание оптической сетки возможно с помощью ламповых или лазерных проекторов, а также специальных микрооптикоэлектромеханических систем технологий [9].

3. Система машинного зрения при помощи промышленной видеокамеры производит захват изображения [8].

На основе имеющейся информации о геометрических параметрах измеряемой детали и сгенерированной на основе 3D-модели геометрической сетки программа (на основе шаблонного метода) сравнивает эталонное изображение сетки и ее снимок, полученный с видеокамеры. В случае если электронная модель геометрической сетки совпадает с моделью сетки, полученной с видеокамеры, программа делает вывод, что реальная деталь соответствует своей электронной модели. Для достижения приемлемого качества анализа поверхности возможно внедрение высокоразрешающих систем наблюдения крупногабаритных изделий [7].

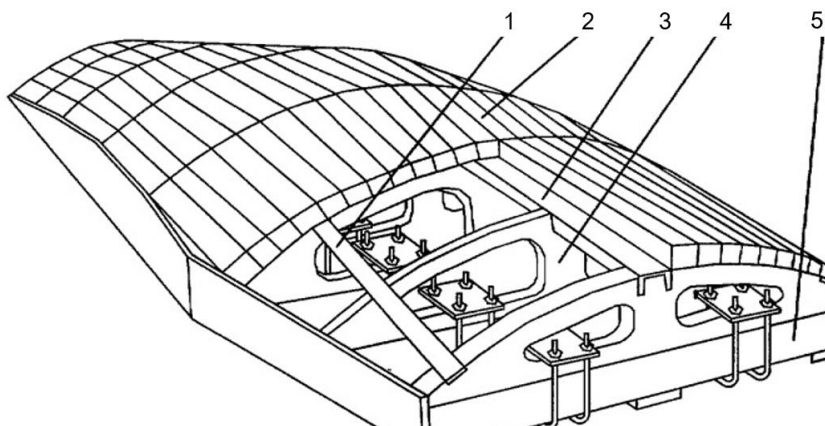


Рис. 1. Обшивка крыла самолета – деталь с двойной кривизной поверхности:

1 – стрингер; 2 – обшивка; 3 – лонжерон; 4 – нервюра; 5 – боковая стенка

Fig. 1. Aircraft wing skin – a part with double surface curvature:

1 – stringer; 2 – skin; 3 – spar; 4 – rib; 5 – side wall

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СЕТОК РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ

В связи с тем, что простые геометрические фигуры при проецировании на поверхность двойной кривизны (в зависимости от кривизны поверхности) могут искажаться по-разному, в рамках проведенных исследований было выявлено несколько оптимальных типов оптических сеток, необходимых для исследования форм объектов. Все приведенные ниже формы сеток представляют собой правильные геометрические фигуры, расположенные с одинаковым шагом друг от друга, такое сочетание позволяет использовать низкопроизводительные микроконтроллеры для анализа изображений, полученных с видеокамеры.

При генерировании геометрической сетки (на основе имеющейся 3D-модели)

любую сложную криволинейную поверхность можно представить как сумму простых геометрических фигур. Форма генерируемой сетки, в основном, зависит от градиента перепада и углов преломления исследуемой поверхности.

Необходимо принять во внимание тот факт, что различные поверхности с различными допусками изготовления должны рассматриваться индивидуально, а для конкретных случаев могут использоваться исключительные виды оптических сеток.

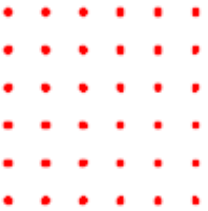
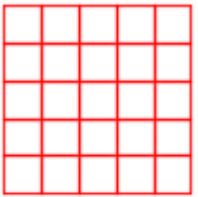
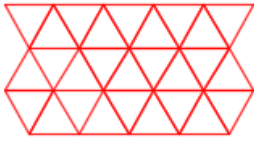
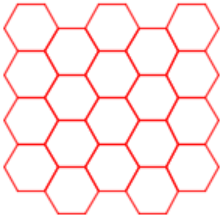
Рассмотрим следующий алгоритм работы программно-аппаратного комплекса, входные данные о контролируемой детали, чтобы управляющая программа могла сопоставить данные полученного изображения с исходными геометрическими параметрами детали.

Таблица 1

Описание применяемых оптических сеток

Table 1

Description of the used optical grids

Внешний вид	Описание
	Точечная оптическая сетка характеризуется наиболее высокой скоростью обработки, допустимо использовать с самыми низкопроизводительными лазерными сканирующими проекторами. Может применяться только для контроля отдельных точек объекта. Исследовать и прогнозировать форму объекта невозможно. Позволяет очень быстро настроить проектор по эталонной поверхности
	Прямоугольная оптическая сетка (в зависимости от плотности построения) может применяться с лазерными сканирующими проекторами различной производительности. Имеется возможность контролировать форму объекта
	Треугольная оптическая сетка при меньшей плотности построения (по сравнению с прямоугольной сеткой) может контролировать форму объекта. В зависимости от плотности может применяться с лазерными сканерами или только с высокоскоростными проекторами
	Многоугольная оптическая сетка является избыточной при исследовании поверхностей, но может использоваться в частных случаях при исследовании сложных поверхностей. Отличается низкой производительностью и большим временем переналадки проектора



4. ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ЛИНИИ СЕТКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИССЛЕДУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В ходе проведенных исследований оптических сеток различной толщины были выявлены минимальные и оптимальные значения толщин оптических сеток. Минимальная толщина линий сетки должна четко распознаваться сканирующим устройством, в нашем случае – видеокамерой.

Минимальная толщина сетки обязана соответствовать светочувствительности камеры и составлять как минимум 1 пиксель на камере (с учетом возникновения погрешностей «засветов», шумов и т.п.), а также необходимо для устойчивого распознавания оптической сетки использовать ее ширину – минимум 2 пикселя на устройстве видеозахвата. Получение данной точности возможно только с применением систем стабилизации видеоизображения [10, 15, 16].

Оптимальная толщина линии сетки должна выбираться в соответствии с полем

допуска, разрешенным от эталонной модели отклонением. При распознавании оптической сетки устройством видеозахвата будет проанализировано попадание проекционного луча в необходимую траекторию сетки, при выходе луча за траекторию объект должен быть отбракован, при совпадении необходимо продолжить дальнейшую обработку в соответствии с технологическим процессом. Возможно внедрение систем автоматизированной поддержки технологического проектирования.

На рис. 2 представлен процесс моделирования наложения оптической сетки на исследуемую деталь. На изображении слева, если деталь соответствует 3D-модели, сгенерированная сетка без искажений накладывается на исследуемую поверхность; в случае если исследуемая поверхность отличается от 3D-модели, то эталонная сетка при проецировании на поверхность будет искажаться, данное искажение отслеживается в автоматическом режиме при помощи видеокамеры.

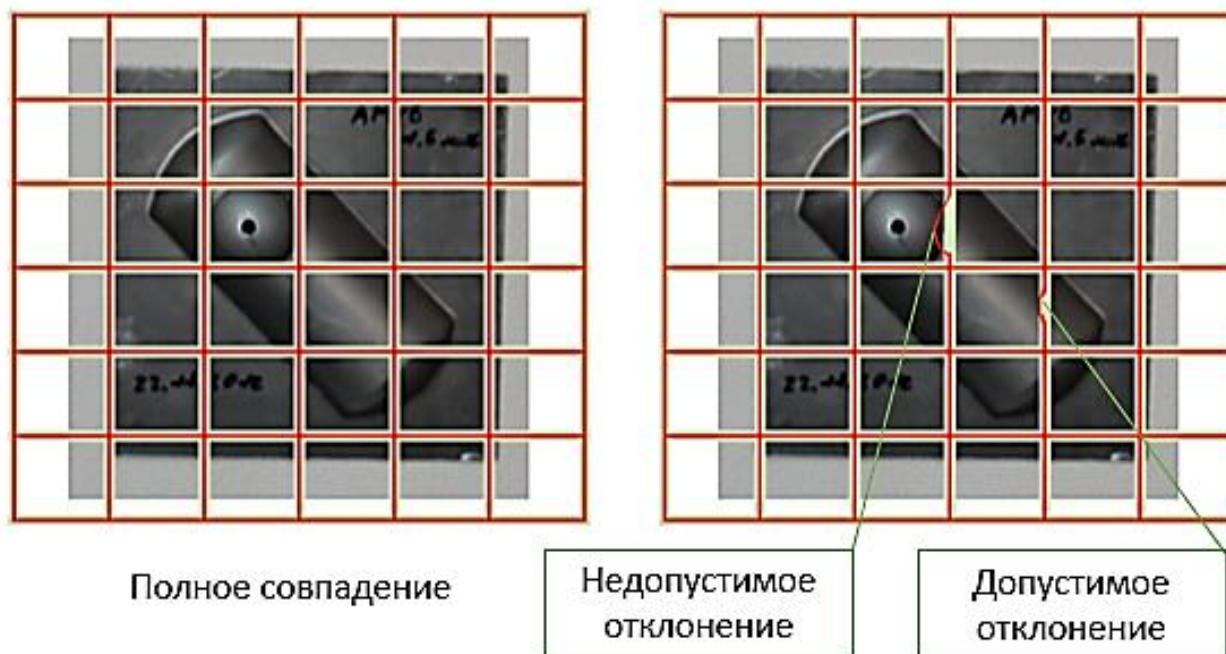


Рис. 2. Графическое представление необходимости использования оптимальной толщины оптической сетки

Fig. 2. Graphical representation of the need for using the optimum thickness of the optical grid

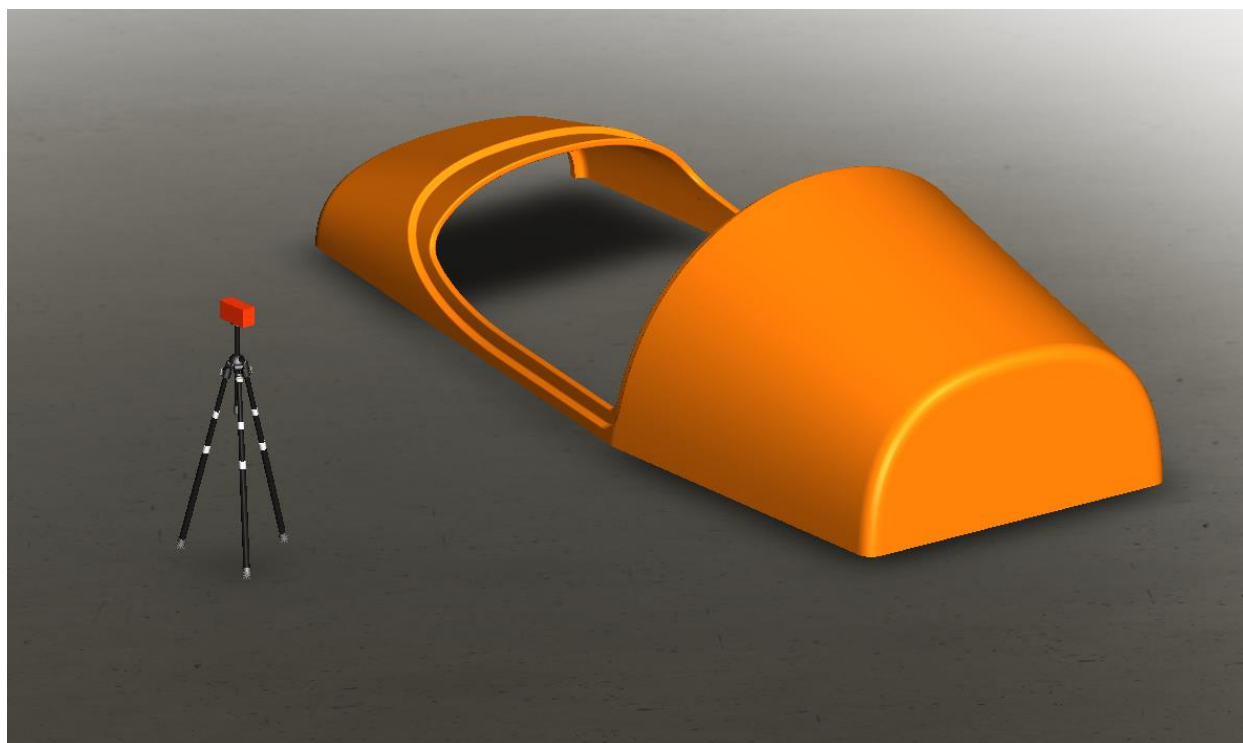


Рис. 3. Пример расположения системы контроля поверхностей относительно исследуемой поверхности

Fig. 3. Example of surface control system location relative to the surface under investigation

5. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ КАМЕРЫ И ПРОЕКТОРА ОТНОСИТЕЛЬНО ИССЛЕДУЕМОЙ ДЕТАЛИ

Для исключения проблем с позиционированием камеры относительно видеопроектора целесообразно выполнить их в едином корпусе с совмещением оптических осей.

При выполнении работ по контролю геометрических параметров крупногабаритных деталей более предпочтительным вариантом выполнения работы является доставка измерительного оборудования к месту нахождения детали для проведения операций измерения.

Деталь находится в стационарном состоянии, оператор выбирает точки размещения проектора и видеокамеры (рис. 3). Программа генерирования геометрической сетки выполняет генерацию сетки, выполняется при различных пространственных положениях детали, тем самым формируется библиотека шаблонных изображений различных вариантов положений сетки при

разных ракурсах съемки. При захвате видеокамерой изображения программа сравнивает полученное изображение с библиотекой шаблонов. Таким образом, при расположении камеры и проектора относительно контролируемой поверхности не обязательно устанавливать оборудование в жестких точках привязки, положение оборудования относительно контролируемой детали и друг друга является относительно произвольным.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дальнейшем авторы исследования планируют разработать программный продукт для персонального компьютера, в котором будут реализованы вышеописанные алгоритмы, а именно – построение геометрической сетки на основе 3D-модели, захват видеоизображения и сравнение полученного видеоизображения для анализа геометрических параметров контролируемой поверхности.



Библиографический список

1. Илюшкин М.В., Марковцев В.А., Марковцева В.В. Совершенствование технологий изготовления гнутых профилей и листовых изделий для авиационной промышленности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4-3. С. 427–434.
2. Архангельская М.А., Вермель В.Д., Забалуев В.Ф., Николаев П.М., Чернышев Л.Л. Методика оценки точности изготовления аэродинамических моделей по материалам измерений на координатно-измерительной машине // Учебные записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 5. С. 78–90.
3. Протасьев В.Б. Некоторые аспекты использования координатно-измерительных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 11-2. С. 391–395.
4. Марков А.И., Кушников В.А. Задача оперативного диагностирования дефектов фюзеляжа Ми-8 при проведении предварительной оценки его ремонтно-пригодности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 3 (23). С. 95–101.
5. Гришин М.В., Ларин С.Н., Соснин П.И. Онтологии проектирования шаблонной оснастки в авиационном производстве // Онтологии проектирования шаблонной оснастки в авиационном производстве. Онтология проектирования. 2016. Т. 6. № 1 (19). С. 7–28.
6. Щуров И.А., Федоров А.В., Федоров В.Б. Расчет геометрических параметров наружных поверхностей отсеков летательных аппаратов на основе координатных измерений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2013. Т. 13. № 2. С. 125–131.
7. Верхогляд А.Г., Габриэлян В.В., Каличкин С.В., Ступак М.Ф. Высокоразрешающая система наблюдения крупногабаритных изделий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2010. Т. 5. № 1. С. 12–15.
8. Дятлов Е.И. Машинное зрение (аналитический обзор) // Математические машины и системы. 2013. № 2. С. 32–40.

9. Сысоева С.О. МОЭМС – доступные технологии генерации и сканирования оптической информации // Компоненты и технологии. 2010. № 8. С. 33–40.
10. Думчев С.В., Думчев Е.В. Стабилизация изображения, полученного со статически установленной видеокамеры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 9-1. С. 64–70.
11. Кашуба Л.А., Жаргалова А.Д. Разработка автоматизированной системы поддержки технологического проектирования в CAD/CAM // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. № 2. С. 92–99.
12. Zhu Yongguo., Xiao Huan, Liu Chunfeng, Zeng Tian. Digital coordination method for aircraft component intersection assembly based on tolerance-map. Isuanji Jicheng Zhizao Xitong, Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS. 1 December 2018. Vol. 24. Issue 12. P. 2975–2985.
13. Xichao Teng, Qifeng Yu, Jing Luo, Xiaohu Zhang, Gang Wang. Pose estimation for straight wing aircraft based on consistent line clustering and planes intersection. Sensors (Switzerland). 2019. Vol. 19(2). P. 358–365.
14. Caminero M.A., Lopez-Pedrosa M., Pinna C., Soutis C. Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 53. P. 76–91.
15. Chunyan Wang, Hilton Tnunay, Zongyu Zuo, Barry Lennox, Zhengtao Ding. Fixed-Time Formation Control of Multirobot Systems: Design and Experiments // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66(8). P. 6292–6301.
16. Changjae Oh, Bumsuh Ham, Hansung Kim, Adrian Hilton, Kwanghoon Sohn. OCEAN: Object-centric arranging network for self-supervised visual representations learning // Expert Systems with Applications. 2019. Vol. 125. P. 281–292.

References

1. Ilyushkin M.V., Markovcev V.A., Markovceva V.V. Improvement of technologies for the production of roll-formed profiles and sheet products for the aviation industry. *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol. 20, no. 4-3, pp. 427–434. (In Russ.).
2. Arhangel'skaya M.A., Vermel' V.D., Zabaluev V.F., Nikolaev P.M., Chernyshev L.L. Estimation methods of aerodynamic model manufacturing accuracy based on measurement data on a coordinate measuring machine. *Uchebnye zapiski central'nyj aerogidrodinamicheskij institute* [Transactions of Central Aerohydrodynamic Institute], 2014, vol. 45, no. 5, pp. 78–90. (In Russ.).
3. Protas'ev V.B. Some aspects of the use of coordi-

- nate-measuring machines. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University" (Izvestiya TulGU)], 2016, no. 11-2, pp. 391–395. (In Russ.).
4. Markov A.I., Kushnikov V.A. The task of prompt diagnosis of Mi-8 fuselage defects during a preliminary assessment of its maintainability. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Technical sciences], 2012, no. 3 (23), pp. 95–101. (In Russ.).
5. Grishin M.V., Larin S.N., Sosnin P.I. Ontology of designing industrial equipment within the aviation production. *Ontologiya proektirovaniya* [Ontology of Designing], 2016, vol. 6, no. 1 (19), pp. 7–28. (In Russ.).
6. Shchurov I.A., Fedorov A.V., Fedorov V.B. Calcula-

tion of aircraft carcase geometrical parameters on the base coordinate measurement. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical Engineering Industry"], 2013, vol. 13, no. 2, pp. 125–131. (In Russ.).

7. Verhoglyad A.G., Gabrielyan V.V., Kalichkin S.V., Stupak M.F. High-resolution system for large-sized articles observations. *Interesko Geo-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia], 2010, vol. 5, no. 1, pp. 12–15. (In Russ.).

8. Dyatlov E.I. Computer vision (Analytical review). *Matematicheskie mashiny i sistemy* [Mathematical Machines and Systems], 2013, no. 2, pp. 32–40. (In Russ.).

9. Sysoeva S.O. Microoptical electromechanical systems – available technology for optical information generation and scanning. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2010, no. 8, pp. 33–40. (In Russ.).

10. Dumchev S.V., Dumchev E.V. Image stabilization is obtained with a statically set the camcorder. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University] (Izvestiya TulGU), 2014, no. 9-1, pp. 64–70. (In Russ.).

11. Kashuba L.A., Zhargalova A.D. Development of an automated system to support technological design in CAD / CAM. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineer-

ing Sciences], 2008, no. 2, pp. 92–99. (In Russ.).

12. Zhu Yongguo., Xiao Huan, Liu Chunfeng, Zeng Tian. Digital coordination method for aircraft component intersection assembly based on tolerance-map. *Isuanji Jicheng Zhizao Xitong, Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*, 1 December 2018, vol. 24, issue 12, pp. 2975–2985.

13. Xichao Teng, Qifeng Yu, Jing Luo, Xiaohu Zhang, Gang Wang. Pose estimation for straight wing aircraft based on consistent line clustering and planes intersection. *Sensors (Switzerland)*, 2019, vol. 19(2), pp. 358–365.

14. Caminero M.A., Lopez-Pedrosa M., Pinna C., Soutis C. Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation. *Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 53, pp. 76–91.

15. Chunyan Wang, Hilton Trunay, Zongyu Zuo, Barry Lennox, Zhengtao Ding. Fixed-Time Formation Control of Multirobot Systems: Design and Experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66(8), pp. 6292–6301.

16. Changjae Oh, Bumsu Ham, Hansung Kim, Adrian Hilton, Kwanghoon Sohn. OCEAN: Object-centric arranging network for self-supervised visual representations learning. *Expert Systems with Applications*, 2019, vol. 125, pp. 281–292.

Критерии авторства

Бублик Д.А., Кононенко Р.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bublik D.A., Kononenko R.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бублик Дмитрий Алексеевич,
инженер-программист ООО «Торег»,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: d.bublik@list.ru

Кононенко Роман Владимирович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры радиоэлектроники
и телекоммуникационных систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: istu_politeh@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrii A. Bublik,
Software Engineer at "Toreg" LLC,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: d.bublik@list.ru

Roman V. Kononenko,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Radio Electronics and Telecommunication Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: istu_politeh@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.914.025

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-678-688>

Разработка методики определения составляющих силы резания при фрезеровании авиационных материалов

© А.Е. Губанов*, А.А. Москвитин**, Т.А. Дуюн*

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

**ООО «Скиф-М» 308017, г. Белгород, Россия

Резюме: Цель – разработка расчетно-экспериментальной методики определения составляющих силы резания при фрезеровании материалов с высокими прочностными свойствами: титанового сплава BT23, конструкционной легированной стали 40ХН2МА и высокопрочного алюминиевого сплава В95 в различных технологических условиях. Выполнена экспериментальная оценка составляющих силы резания при фрезеровании твердосплавными пластинами разной геометрии с различными технологическими режимами с использованием промышленного оборудования, инструмента и технологической оснастки. Предложена расчетная методика аппроксимации экспериментальных значений в виде степенных зависимостей на основе определения мгновенных значений сечения среза в зависимости от угла внедрения инструмента, показывающая хорошую сходимость с экспериментальными данными. Выявлены особенности динамики силы резания при фрезеровании исследуемых материалов. Для стали 40ХН2МА представленная методика позволяет получить точное представление о действующих составляющих силы резания. Для титанового сплава выявлен эффект запаздывания затухания составляющих силы резания на этапе выхода режущей кромки из зоны резания, природа которого требует дополнительного исследования.

Ключевые слова: фрезерование, титановый сплав, авиационные материалы, составляющие силы резания, экспериментальные результаты, режимы резания

Информация о статье: Дата поступления 15 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 21 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Губанов А.Е., Москвитин А.А., Дуюн Т.А. Разработка методики определения составляющих силы резания при фрезеровании авиационных материалов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):678–688. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-678-688

Development of methods for cutting force components determination when milling aviation materials

Anton E. Gubanov, Aleksandr A. Moskvitin, Tatiana A. Duyun

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

SKIF-M LLC, Belgorod, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to develop an experimental calculation methodology for determining cutting force components when milling hard-to-cut materials: VT23 titanium alloy, 40HN2MA structural alloyed steel and V95 high-strength aluminum alloy in different cutting conditions. An experimental evaluation of the cutting force components is carried out when milling with carbide inserts of different geometry in different technological conditions using industrial equipment, tools and tooling. The paper proposes a calculation methodology for experimental values approximation as exponential functions based on the determination of instantaneous values of the cut cross section depending on the angle of tool penetration. The presented methodology demonstrates good convergence with experimental data. Some features of cutting force dynamics when milling the materials under investigation have been revealed. For the case of 40HN2MA structural alloyed steel the presented methodology provides an accurate idea on the acting components of the cutting force. The effect of lagging attenuation of the cutting force components at the stage when the cutting edge leaves the cutting zone has been revealed for the titanium alloy. The nature of this effect may be a case of future study.

Keywords: milling, titanium alloy, aviation materials, cutting force components, experimental results, cutting modes

Information about the article: Received February 15, 2019; accepted for publication June 21, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Gubanov A.E., Moskvitin A.A., Duyun T.A. Development of methods for cutting force components determi-

nation when milling aviation materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):678–688. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-678-688

1. ВВЕДЕНИЕ

Фрезерование является одним из наиболее широко используемых методов обработки изделий в современных условиях применения обрабатывающих центров и другого высокопроизводительного оборудования, работающего с интенсивными технологическими режимами. Сила резания – ключевой фактор, формирующий качество поверхности, физико-механические свойства поверхностных слоев, а также обуславливающий параметры точности. При тенденции ужесточения требований к эксплуатационным характеристикам изделий и переходе к новым типам конструкционных материалов с повышенными прочностными свойствами остро возникает необходимость прогнозирования силовых параметров процесса резания, поэтому определение составляющих силы резания является актуальной научной задачей.

В настоящее время вопросы определения силы резания наиболее полно проработаны для сталей общего назначения применительно к процессам точения и строгания, при этом задача определения силы резания при фрезеровании освещена менее детально, в частности для труднообрабатываемых материалов, нержавеющей стали, хромоникелевых и титановых сплавов^{1,2} [1–12].

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является разработка методики, совмещающей классические представления о силах, действующих на заготовку в процессе обработки, а также современные программно-аппа-

ратные комплексы анализа процессов обработки фрезерным инструментом для определения особенностей силовой картины резания при различных условиях обработки.

3. ОПИСАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В работе [1] приводятся выражения для расчета сил резания при фрезеровании с учетом влияния покрытия режущего инструмента на формирование силовых характеристик процесса. Рассматриваемая авторами концепция предполагает использование множества безразмерных комплексов для расчетов (стали марки 40Х13). Чтобы реализовать данную концепцию расчетов силовых процессов труднообрабатываемых материалов, необходим трудоемкий анализ большого количества данных с целью определения комплексов эмпирических коэффициентов.

Авторами А.А. Губановой и Д.Р. Храпенко в работе [2] предлагается иная концепция, заключающаяся в использовании классического подхода с применением степенных зависимостей и определением мгновенных значений сечений среза в зависимости от угла внедрения инструмента, являющаяся более перспективной применительно к рассматриваемой в данной статье проблеме.

В своей работе О.М. Балла предлагает методику полунатурного моделирования сил резания при фрезеровании, в том числе для случая одновременной работы нескольких зубьев фрезы. Рассматривается обработка титанового сплава ВТ20 различными типами фрез с использованием экспериментальных результатов, предла-

¹Фоменко Р.Н. Исследование процесса обработки точением инструментами с нанопокрывтиями с целью обеспечения требуемого качества поверхностного слоя деталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Рыбинск, 2010. 227 с. / Fomenko R.N. Research of the turning process with nano coated tools ensuring the required quality of part surface layer: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.02.07. Rybinsk, 2010, 227 p.

²Грубый С.В. Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными резцами: учеб. пособ. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 107 с. / Grubiy S.V. Modeling of the cutting process with carbide and diamond cutters: workbook. M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2010, 107 p.



гается исследовать частные зависимости силы резания от толщины и ширины среза.

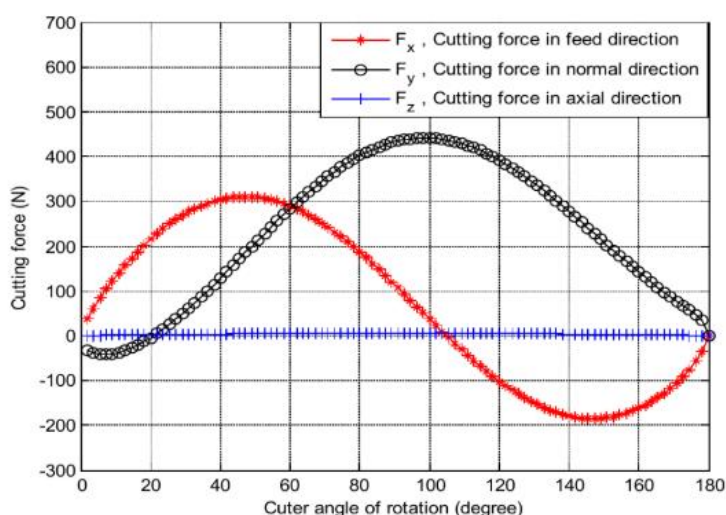
Коллектив авторов из Лаосского университета в статье [3] предлагает комплексный анализ мгновенных значений сил резания путем разбиения на элементарные составляющие и последующим приведением выражений для составляющих сил резания F_x , F_y , F_z , действующих на заготовку общего вида. Стоит отметить, что полученная форма графиков составляющих сил резания соответствует описываемым данным, полученным практически, например, в работе [4] (рис. 1), что говорит о правильно выбранной концепции расчета, но при разработке данной методики коллектив авторов не рассматривает ее применение для различных материалов.

При разработке (представленной в настоящей статье) методики частично были применены методы, используемые в представленных ранее трудах, с рассмотрением возможностей применения для различных типов материалов, что является необходимым для определения особенностей силовой картины при обработке авиационных материалов.

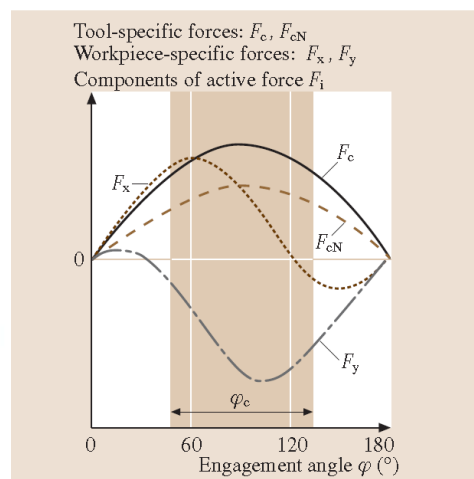
4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью оценки силовых составляющих процесса фрезерования для различных материалов были проведены экспериментальные исследования в инженерном центре ООО «Скиф-М» с использованием промышленного оборудования, инструмента и технологической оснастки. В качестве основного оборудования использовался вертикальный обрабатывающий центр HaasVF-2SS, в качестве режущего инструмента применялись торцовые и концевые фрезы с многогранными пластинами производства ООО «СКИФ-М».

Измерения составляющих силы резания проводились с применением многокомпонентного пьезоэлектрического динамометра на базе плиты 9255C производства KISTLER (рис. 2) в различных технологических условиях: варьировались технологические параметры (ширина фрезерования, скорость резания, подача на зуб, диаметр фрезы), геометрические параметры многогранных пластин (пластины квадратной,



a



b

Рис. 1. Составляющие сил резания: a – полученные авторами в работе [3];
b – представленные в работе [4]

Fig. 1. Cutting force components: a – obtained by the authors in the study [3]; b – presented in the study [4]



Рис. 2. Экспериментальная установка
 Fig. 2. Experimental assembly

Таблица 1

Технологические условия проведения экспериментов

Table 1

Technological conditions for the experiments

№ опыта	Обрабатываемый материал	Диаметр фрезы, мм	Угол в плане пластины, °	Технологические режимы фрезерования				Геометрия пластины	
				глубина, мм	ширина, мм	скорость, м/мин	подача на зуб, мм/зуб		
1	BT23	50	90	4	16	24	0,1	SOMT120408	
2	BT23	50	90	4	6	24	0,1	SOMT120408	
3	40XH2MA	40	90	2	30	120	0,15	SDMT08T308	
4	BT23	25	00	2	8	35	0,125	RDNT0802EN	
5	B95	40	90	5	15	250	0,08	XDGX170524	

круглой, прямоугольной формы) и обрабатываемый материал (титановый сплав, конструкционная легированная сталь, высокопрочный алюминиевый сплав). Данные экспериментов представлены в табл. 1.

Стоит отметить, что в представленных опытах режущие пластины имеют комплексную форму с изменяющимся по длине режущей кромки передним и задним углами.

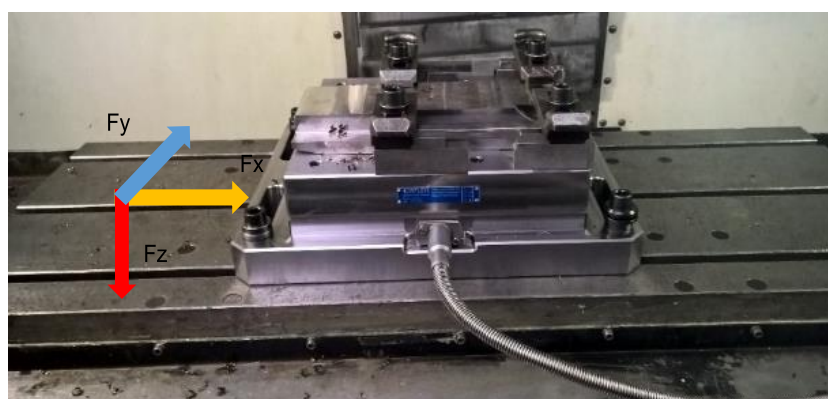


Рис. 3. Ориентация координатных осей при регистрации компонент силы резания
 Fig. 3. Orientation of the coordinate axes when registering cutting force components

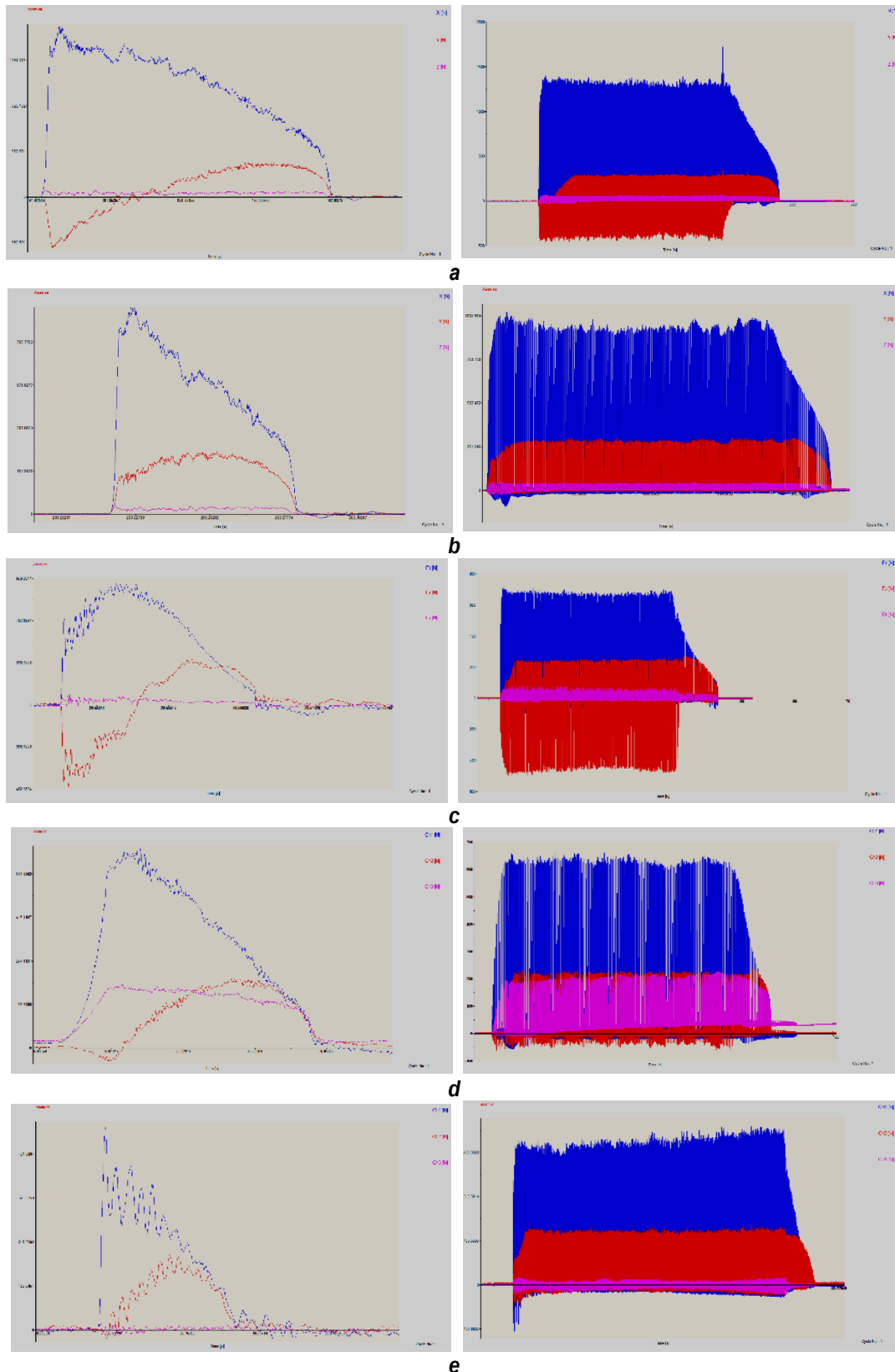


Рис. 4. Результаты экспериментов: слева показан единственный рез, справа представлена общая картина усилий действующих на заготовку, синим цветом F_x , красным цветом F_y , розовым цветом F_z ; а, б, в, г, д, е – результаты экспериментов № 1, № 2, № 3, № 4, № 5 (табл. 1)

Fig. 4. Experimental results: a single cut is shown on the left, a general picture of the forces acting on the workpiece is shown on the right. Blue graph is for F_x , red is for F_y , pink – for F_z ; а, б, в, г, д, е are the results of experiments No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, No. 5 respectively (Table 1)

Для всех представленных опытов геометрические параметры инструмента находятся в следующих пределах: передний угол главной режущей кромки γ : 5–10°, задний угол главной режущей кромки α : 15–19°. Данные параметры в рамках каждого опыта не изменяются и в последующем расчете не фигурируют (для каждого опыта производится подбор параметра C_p , учитывающего условия фрезерования). В каждом представленном опыте исследования производились в однозубом режиме.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА

В ходе экспериментов при помощи специализированного программного обеспечения DynaWare производилась регистрация действующих на заготовку компонент силы резания по осям, направления которых указаны на рис. 3. Значения величин силовых нагрузок (действующих на заготовку) снимались в виде графиков одновременно по 3-м компонентам. Проходы во всех экспериментах производились вдоль оси Y (направление совпадает с положительным направлением оси координат). Полученные при измерении результаты представлены на рис. 4.

Полученные результаты обработаны и сведены в таблицу с усредненными значениями максимальных нагрузок по 3-м составляющим силы, действующей на заготовку в процессе обработки в зависимости

от формы пластины и технологических режимов резания.

Стоит отметить, что для опытов № 1 и № 2, отличающихся только изменением ширины фрезерования (при разнице данного параметра от 6 до 16 мм), увеличение пиковой нагрузки составило для F_x от 900 до 1350 Н и F_y от 255 до 360 Н, соответственно. Это обусловлено тем, что при увеличении ширины фрезерования в данном диапазоне увеличение максимального сечения стружки не настолько значительно, а при условии однозубого фрезерования увеличение пиковых нагрузок будет также не особенно велико.

Для аналитического представления составляющих силы резания воспользуемся степенным выражением с учетом мгновенного значения толщины срезаемого слоя:

$$P_z = C_p \cdot s_{zm}^k \cdot t^\mu, \quad (1)$$

$$P_r = 0,7 \cdot P_z, \quad (2)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания; C_p – коэффициент, зависящий от условий обработки; s_{zm} – мгновенное значение толщины срезаемого слоя; t – глубина резания; k, μ – эмпирические коэффициенты; P_r – составляющая силы резания, нормальная к направлению движения главной режущей кромки.

Таблица 2

Усредненные значения компонент силы резания по результатам эксперимента

Table 2

Average values of the cutting force components according to the results of the experiment

№	Геометрическая форма пластины	Глубина фрезерования, мм	Ширина фрезерования, мм	Компоненты силы резания, Н			Относительные значения компонент силы резания $F_x : F_y : F_z$
				F_x	F_y	F_z	
1		4	16	1350	360	60	1:0,266:0,044
2		4	6	900	255	40	1:0,283:0,044
3		2	30	680	450	10	1:0,662:0,015
4		2	8	600	200	180	1:0,333:0,300
5		5	15	480	170	10	1:0,354:0,020



Для определения мгновенных значений толщины срезаемого слоя sz_m произведем расчет по сходному принципу с применяемым в работе [2]. В отличие от указанного метода, вместо определения толщины как расстояния между точками на пересечении окружностей со смещением (равным подаче на зуб и прямой из центра окружности под углом) равным углу положения зуба воспользуемся построением трохоиды. Секущую линию для определения сечения построим аналогично из мгновенного центра вращения под углом равным углу положения пластины.

Траектория движения вершины режущего клина в сечении главной плоскости резания представляет собой трохоиду. Данная трохоида представлена на рис. 5.

Уравнение трохоиды построим при помощи следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} X = \frac{D}{2} \cdot \sin(\omega) + \frac{\omega}{360} \cdot f_z, \\ Y = \frac{D}{2} \cdot \cos(\omega), \\ \omega \in [0..720]. \end{cases} \quad (3)$$

где ω – угол положения режущего клина, отложенный от оси Y (в градусах); D – диаметр фрезы; f_z – подача на зуб; X, Y – координаты точек трохоиды.

Задача определения мгновенного значения сечения срезаемого слоя в главной плоскости резания сводится к определению длины отрезка $(X1;Y1) - (X2;Y2)$, полученного путем пересечения образующей в соответствующей точке $(X1;Y1)$ с предшествующим витком трохоиды (рис. 5).

Выражение для нахождения координат точки $(X1;Y1)$ имеет следующий вид:

$$\begin{cases} X1 = \frac{D}{2} \cdot \sin(\omega1) + \frac{\omega1}{360} \cdot f_z, \\ Y1 = \frac{D}{2} \cdot \cos(\omega1), \\ \omega1 \in (360..720). \end{cases} \quad (4)$$

Координаты точки $(X2;Y2)$ находятся на пересечении трохоиды и образующей вида:

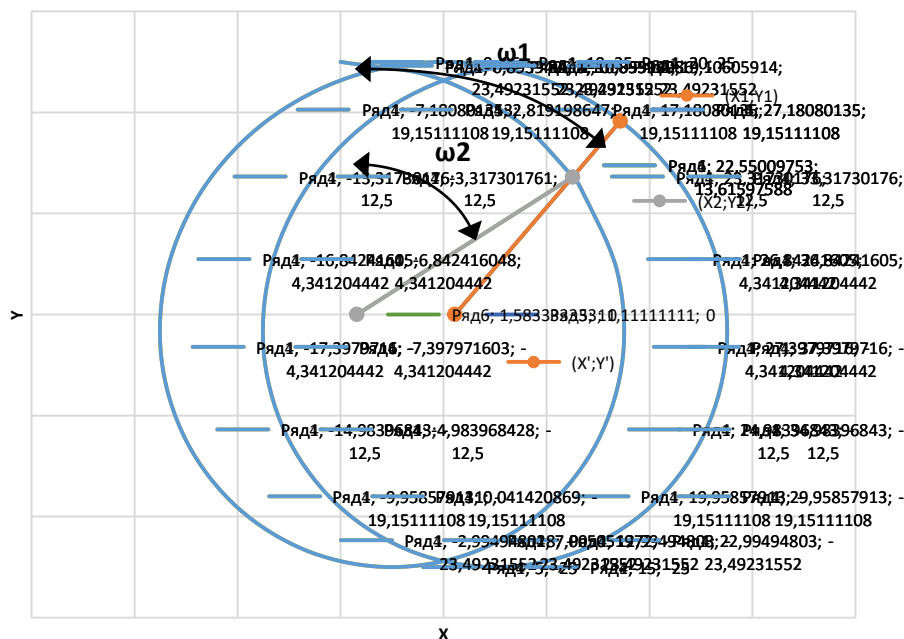


Рис. 5. Общий вид траектории движения режущего клина
Fig. 5. General view of the cutting edge trajectory

$$\frac{X_2 - X'}{X_1 - X'} = \frac{Y_2 - Y'}{Y_1 - Y'}, \quad (5)$$

где X' и Y' – точки центра образующей для точек трохоиды $(X_1; Y_1)$.

Выражение для нахождения точки X_2, Y_2 как для точки трохоиды имеет вид

$$\begin{cases} X_2 = \frac{D}{2} \cdot \sin(\omega_2) + \frac{\omega_2}{360} \cdot f_z, \\ Y_2 = \frac{D}{2} \cdot \cos(\omega_2), \\ \omega_2 \in (0..360). \end{cases} \quad (6)$$

После сведения уравнений 4–6 в общую систему, выражая из нее X_2 и Y_2 , получаем систему следующего вида:

$$\begin{cases} Y_2 = \frac{X_2 - \omega_1 \cdot f_z}{\operatorname{ctg}(\omega_1)}, \\ X_2 = \sqrt{\frac{D^2}{4} - Y_2^2} + a \cos\left(\frac{2Y_2}{360}\right). \end{cases} \quad (7)$$

Для нахождения точек $(X_1; Y_1)$ и $(X_2; Y_2)$ воспользуемся графо-аналитическим методом. Для пересчета значений используем направления составляющих вектора суммарного усилия резания, изображенные на рис. 6.

Формулы пересчета:

$$\begin{aligned} P_r &= F_x \cos(\omega) + F_y \sin(\omega), \\ P_z &= -F_y \cos(\omega) - F_x \sin(\omega), \\ F_x &= P_r \cos(\omega) + P_z \sin(\omega), \\ F_y &= P_z \cos(\omega) - P_r \sin(\omega). \end{aligned} \quad (8)$$

В результате вычислений получены следующие значения коэффициентов (табл. 3) для условий экспериментов, представленных в табл. 1, 2 и на рис. 4.

В табл. 4 для примера представлены расчетные и экспериментальные значения мгновенных величин компонент силы резания для условий эксперимента № 1, угол положения режущего клина принят в диапазоне от 70° до 0° , что соответствует углу внедрения инструмента.

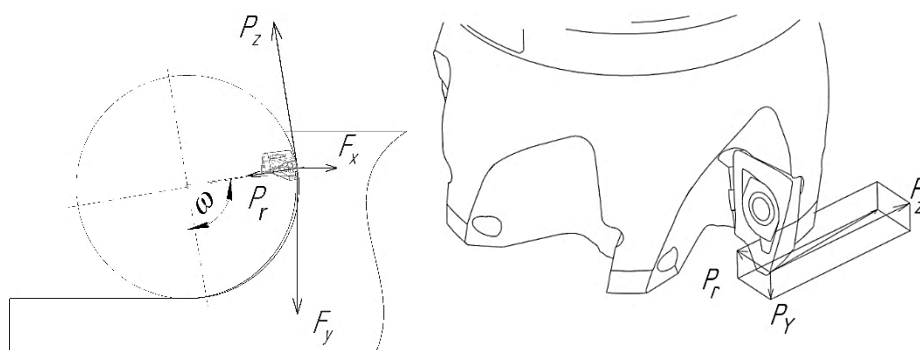


Рис. 6. Направление составляющих векторов силы резания
 Fig. 6. Orientation of cutting force vector components

Таблица 3

Расчетные мгновенные значения коэффициентов

Table 3

Instantaneous values of calculated cutting force

№ эксперимента	C_p	k	μ	$K = P_x : P_z$
1	1150	0,2	-0,07	0,7
2	1150	0,2	-0,07	0,7
3	1320	0,2	-0,05	0,3
4	1300	0,3	-0,07	0,52
5	450	0,25	-0,08	0,35



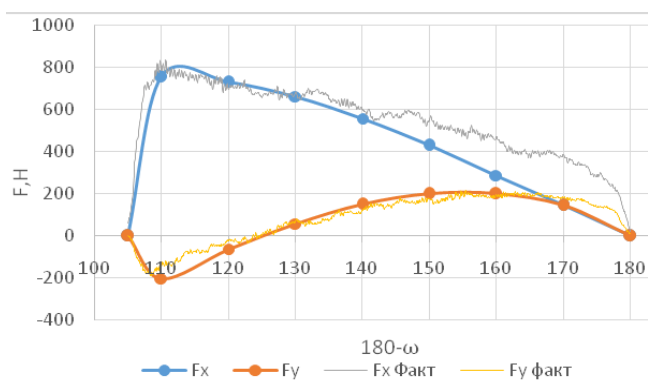
Таблица 4

Расчетные мгновенные значения толщины срезаемого слоя

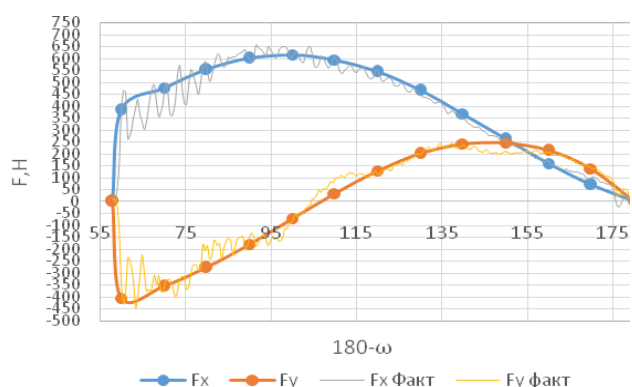
Table 4

Calculated instantaneous values of cut layer thickness

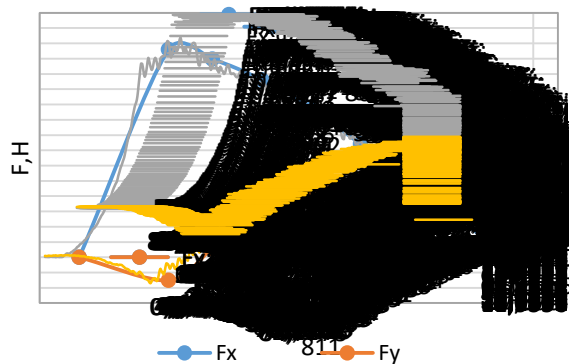
$\omega, ^\circ$	$S_{zm}, \text{ мм}$	$P_z, \text{ Н}$	$P_f, \text{ Н}$	$F_x, \text{ Н}$	$F_y, \text{ Н}$	$F_x, \text{ факт, Н}$	$F_y, \text{ факт, Н}$
70	0,075204	639,580	447,706	754,133	-201,957	783,966	-141,815
60	0,069332	599,307	419,515	728,772	-63,657	706,238	-22,614
50	0,061357	543,492	380,445	660,884	57,913	676,300	64,911
40	0,051518	472,573	330,801	557,173	149,377	602,509	119,934
30	0,040114	386,847	270,793	427,937	199,623	542,816	174,957
20	0,027488	285,902	200,131	285,846	200,211	469,116	196,930
10	0,014023	166,869	116,808	144,010	144,050	386,444	178,619
0	0	0	0	0	0	22,705	10,254



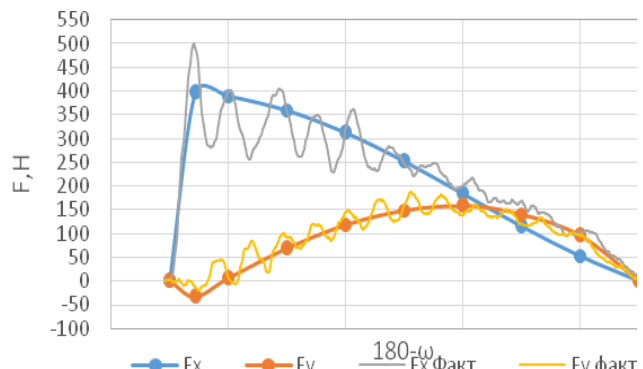
a



b



c



d

Рис. 7. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений усилий, действующих на заготовку: а – эксперимент № 1, № 2; б – эксперимент № 3; с – эксперимент № 4; д – эксперимент № 5

Fig. 7. Comparison of the calculated and experimental values of the forces acting on the workpiece: а – experiment no. 1, no. 2; б – experiment no. 3; с – experiment no. 4; д – experiment no. 5

6. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Графическое отображение расчетных значений, полученных с использованием выражений (1)–(9) в сопоставлении с

экспериментальными, приведено на рис. 7.

Анализ графиков рис. 7 показывает хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений. Исключение составляют опыты № 1, № 2 (рис. 7 а), для кото-

рых в области падения усилия резания наблюдается значительное запаздывание расчетных значений. Природа данного запаздывания затухания сил резания является предметом для дополнительных исследований и уточнений. Стоит отметить, что данный эффект проявляется только при обработке титанового сплава пластиной с квадратной геометрией.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенная расчетная методика определения составляющих силы резания в виде степенных зависимостей на основе определения мгновенных значений сечений среза (в зависимости от угла внедрения инструмента) показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными и позволяет с достаточной точностью

оценивать силовые характеристики процесса резания. Полученные графические зависимости соответствуют известным представлениям.

2. Выявлены особенности динамики силы резания при обработке титанового сплава, конструкционной легированной стали и высокопрочного алюминиевого сплава. При фрезеровании титанового сплава явно выражено увеличение разницы между теоретическими и экспериментальными значениями составляющей силы резания F_x на выходе режущей кромки из зоны резания. Стоит отметить, что данный эффект проявляется только для труднообрабатываемого материала. Природа данного запаздывания затухания сил резания служит предметом для дополнительных исследований и уточнений расчетной методики.

Библиографический список

1. Елкин М.С., Безъязычный В.Ф. Влияние покрытия режущего инструмента на силу резания при финишном концевом фрезеровании // XIII Королевские чтения: сб. тр. Междунар. молодежной науч. конф. (г. Самара, 6–8 октября 2015 г.). Самара, 2015. С. 199–200.
2. Губанова А.А., Храпенко Д.Р. Математическое моделирование сил резания при попутном фрезеровании // Юбилейная конф. студентов и молодых ученых, посвященная 85-летию ДГТУ: сб. докл. науч.-техн. конф. (г. Ростов-на-Дону, 12–13 мая 2015 г.). Ростов-на-Дону, 2015. С. 181–189.
3. Ojolo S.J., Agunsoye O.J., Adesina O., Sobamowo G.M. Force Modelling in High Speed End-Milling of Super Alloys // Journal of Mechanical Engineering and Automation 2015. Vol. 5 (1). P. 56–66.
4. Grote K.-H., Antonsson E.K. Springer Handbook of Mechanical Engineering. New York: Springer Science+Business Media LLC, 2013. 1650 p.
5. Розенберг А.М., Куфарев Г.Л., Розенберг Ю.А., Козлов А.А., Тахман С.И. Расчет сил резания при торцевом фрезеровании // Известия Томского политехнического университета. 1965. Т. 138. С.

- 184–191.
6. Горбунов М.Н. Основы технологии производства самолетов. М.: Машиностроение, 1976. 260 с.
7. Подпоркин В.Г., Бердников Л.Н. Фрезерование труднообрабатываемых материалов. Л.: Машиностроение, 1983. 136 с.
8. Кудояров Р.Г., Башаров Р.Р. Расчетный метод определения траектории движения оси шпинделя станка при высокоскоростной обработке // Технология машиностроения. 2011. № 4. С. 26–29.
9. Казимиров А.А., Кугаевский С.С., Огородникова О.М. Конечно-элементный анализ концевых фрез для учета упругих отжатий при выборе режимов резания в точном приборо- и машиностроении // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 12. С. 148–151.
10. Сенькин Е.Н., Истомин В.Ф., Журавлев С.А. Основы теории и практики фрезерования материалов. Л.: Машиностроение, 1989. 103 с.
11. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
12. Rott O., Homberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Berlin: WIAS, 2006. No. 1151. 23 p.

References

1. Elkin M.S., Bez"yazchnyj V.F. Vliyanie pokrytiya rezhushchego instrumenta na silu rezaniya pri finishnom koncevom frezerovanii [Influence of cutting tool coating on the cutting force under finishing end-milling operation]. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii "XIII Korolevskie chteniya" [Collected works of the International Youth

- scientific Conference "XIII Royal Readings", Samara, 6–8 October 2015]. Samara, 2015, pp. 199–200. (In Russ.).
2. Gubanov A.A., Hrapenko D.R. Matematicheskoe modelirovanie sil rezaniya pri poputnom frezerovanii [Mathematical modeling of cutting forces for climb milling]. Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy



- konferencii "Yubilejnaya konferenciya studentov i molodyh uchenykh, posvyashchennaya 85-letiyu Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta" [Collected reports of the scientific and technical conference "Anniversary conference of students and young scientists devoted to the 85th anniversary of Don state technical university", Rostov-na-Donu, 12–13 May 2015]. Rostov-na-Donu, 2015, pp. 181–189. (In Russ.).
3. Ojolo S.J., Agunsoye O.J., Adesina O., Sobamowo G.M. Force Modelling in High Speed End- Milling of Super Alloys. *Journal of Mechanical Engineering and Automation*. 2015, vol. 5 (1), pp. 56–66.
4. Grote K.-H., Antonsson E.K. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. New York: Springer Science+Business Media LLC, 2013. 1650 p.
5. Rozenberg A.M., Kufarev G.L., Rozenberg Yu.A., Kozlov A.A., Tahman S.I. Calculation of cutting forces at face milling. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 1965, vol. 138, pp. 184–191. (In Russ.).
6. Gorbunov M.N. *Osnovy tehnologii proizvodstva samoletov* [Aircraft production technology basics]. M.: Mashinostroenie Publ., 1976, 260 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Губанов А.Е., Москвитин А.А., Дуюн Т.А. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Губанов Антон Евгеньевич,
аспирант,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород,
ул. Костюкова, 46, Россия;
✉ e-mail: anton.e.gubanov@gmail.com

Москвитин Александр Александрович,
кандидат технических наук,
генеральный директор,
ООО «Скиф-М»,
308017, г. Белгород, ул. Волчанская, 159, Россия;
e-mail: MoskvitinAA@skif-m.net

Дуюн Татьяна Александровна,
доктор технических наук,
заведующая кафедрой
технологии машиностроения,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород,
ул. Костюкова, 46, Россия;
e-mail: tanduun@mail.ru

7. Podporkin V.G., Berdnikov L.N. *Frezerovanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Milling of hard-to-machine materials]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1983, 136 p. (In Russ.).
8. Kudojarov R.G., Basharov R.R. Calculation method for determining the machine-tool spindle axis trajectory under high-speed cutting. *Tehnologija mashinostroenija*. 2011, no. 4, pp. 26–29. (In Russ.).
9. Kazimirov A.A., Kugaevskij S.S., Ogorodnikova O.M. Finite-element analysis of end mills to account for the elastic wrung the choice of the cutting in a precision instrument and machinery. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012, no. 12, pp. 148–151. (In Russ.).
10. Sen'kin E.N., Istomin V.F., Zhuravlev S.A. *Osnovy teorii i praktiki frezerovaniya materialov* [Theory and practice of metal milling]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1989, 103 p. (In Russ.).
11. Starkov V.K. *Fizika i optimizacija rezaniya materialov* [Physics and optimization of material cutting]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009, 640 p. (In Russ.).
12. Rott O., Homberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Berlin: WIAS, 2006, no. 1151, 23 p.

Authorship criteria

Gubanov A.E., Moskvitin A.A., Duyn T.A. have equal authors rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton E. Gubanov,
Post-graduate student,
Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukov St., Belgorod 308012, Russia;
✉ e-mail: anton.e.gubanov@gmail.com

Aleksandr A. Moskvitin,
Cand. Sci. (Eng.),
CEO, SKIF-M LLC,
159 Volchanskaya St., Belgorod, 308017, Russia;
e-mail: MoskvitinAA@skif-m.net

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 62.752, 621.534, 629.4.015

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-689-698>

Межпарциальные связи в механических колебательных системах с двумя степенями свободы: возможности формирования динамических состояний

С.В. Елисеев*, Н.К. Кузнецов**, А.В. Елисеев*, Вьонг Куанг Чык*

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

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

Резюме: Цель работы заключается в развитии методологических позиций в технологиях построения математических моделей механических колебательных систем с дополнительными связями, реализуемыми различными механизмами. Рассматриваются возможные формы конструктивно-технических решений в задачах оценки и управления динамическими состояниями технологических и транспортных машин. Методы исследования построены на использовании аналитического аппарата структурного математического моделирования и теории автоматического управления. Научная новизна исследований заключается в детализации представлений об особенностях влияния межпарциальных связей на динамические свойства системы в целом. Разработан метод построения математических моделей взаимодействий на основе введения и использования передаточных функций межпарциальных связей. Приводятся новые научные результаты, отражающие особенности динамических свойств (вносимых дополнительными связями) и результаты вычислительного моделирования. Работа представляет интерес для специалистов в области машиноведения, динамики и прочности машин. Получены аналитические соотношения, определяющие особенности формирования распределений амплитуд колебаний точек «рабочих органов» по их длине.

Ключевые слова: передаточные функции, межпарциальные связи, динамическое состояние, дополнительные связи, связность движений

Информация о статье: Дата поступления 17 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 05 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Елисеев А.В., Вьонг Куанг Чык. Межпарциальные связи в механических колебательных системах с двумя степенями свободы: возможности формирования динамических состояний. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):689–698. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-689-698

Interpartial connections in mechanical oscillatory systems with two degrees of freedom: possibilities for dynamic condition formation

Sergei V. Eliseev, Nikolai K. Kuznetsov, Andrei V. Eliseev, Vuong Quang Truc

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to develop methodological positions in the technologies of building mathematical models of mechanical oscillatory systems with additional ties implemented by various mechanisms. Consideration is given to the possible forms of structural and technical solutions in the problems of evaluation and control of dynamic states of technological and transport machines. Research methods are based on the use of the analytical apparatus of structural mathematical modeling and the theory of automatic control. The scientific novelty of the research lies in the detailed description of the influence of interpartial connections on the dynamic properties of the system as a whole. The method of constructing mathematical interaction models is developed on the basis of introduction and use of transfer functions of interpartial connections. The paper presents new scientific results reflecting the features of dynamic properties introduced by additional ties and the results of computer simulation. The work is of interest to the specialists in the field of mechanical engineering, dynamics and strength of machines. Analytical relations are obtained that determine the formation features of amplitude distribution of oscillations of "working bodies" points along their length.

Keywords: transfer functions, interpartial connections, dynamic condition, additional ties, motion connectivity

Information about the article: Received April 17, 2019; accepted for publication June 05, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Eliseev S.V., Kuznetsov N.K., Eliseev A.V., Vuong Quang Truc. Interpartial connections in mechanical oscillatory systems with two degrees of freedom: possibilities for dynamic condition formation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):689–698. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-689-698

1. ВВЕДЕНИЕ

Многие технические объекты технологического назначения работают в условиях интенсивного вибрационного нагружения. Обеспечение надежности функционирования и безопасности эксплуатации таких объектов требует решения задач оценки и контроля динамических состояний рабочих органов машин, их элементов и машин в целом при проектировании [1–5].

Большое значение в проведении оценочных мероприятий, связанных с определением возможностей получения необходимой для расчетов информации, имеет выбор расчетных схем, на основе которых могли бы быть получены динамические модели подобных машин. Во многих случаях, относящихся к динамике машин, в качестве таких моделей обычно выбираются механические колебательные системы с несколькими степенями свободы, типовыми элементами которых являются сосредоточенные или распределенные инерционные параметры объектов управления, демпфирующие и упругие устройства (пружины) с линейными свойствами. На предварительных этапах исследования предполагается, что исходная линейная механическая колебательная система совершает малые колебания относительно положения статического равновесия или процесса установившегося движения. Получаемые математические модели в виде системы обыкновенных дифференциальных линейных уравнений 2-го порядка с постоянными коэффициентами служат основой для построения специальных методов оценок динамических состояний технических объектов при различных внешних воздействиях и условиях работы [6–10]. Важнейшей задачей обеспечения требуемых динамических качеств технологических машин в условиях интенсивных динамических нагружений являются возможность оценки, контроля и формирования определенных динамических

состояний вибрационного поля машины путем создания и поддержания требуемого распределения амплитуд колебаний точек рабочих органов, характера динамического взаимодействия элементов, определяемых заданной связностью движений и вызывающих специфичные динамические режимы работы. Такие состояния достигаются введением в колебательные системы дополнительных связей, которые реализуются с помощью механизмов различных типов, в т.ч. шарнирных, зубчатых, винтовых, а также устройств преобразования движения (УПД) [11]. Как показано в этих работах, рациональным подходом для исследования динамических состояний подобных систем является использование метода структурного математического моделирования и аппарата передаточных функций.

В предлагаемой статье (на примере механической колебательной системы с двумя степенями свободы с дополнительными связями в виде винтового и рычажных механизмов) приведены результаты исследований влияния межпарциальных связей на динамическое состояние технологической машины, работающей в условиях интенсивных нагружений, а также определены параметры дополнительных связей, обеспечивающие формирование требуемой структуры вибрационного поля машины.

2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетную схему технологической машины с дополнительными связями представим в виде механической колебательной системы с двумя степенями свободы с рабочим органом в виде протяженного твердого тела массой M и моментом инерции J , совершающего плоские вертикальные колебательные движения (рис. 1). Рабочий орган опирается на упругие элементы в виде линейных пружин с коэффициен-

тами жесткости k_1 и k_2 , а его центр масс (т. О) расположен на расстояниях l_1 и l_2 от концов. Помимо упругих элементов рабочий орган связан с опорной поверхностью посредством шарнирных двухзвенников AA_1A_2 и BB_1B_2 с длинами звеньев l_3, l_4 и l_5, l_6 и установочными углами φ_1 и φ_{10}, φ_2 и φ_{20} с помощью вращательных кинематических пар пятого класса A, A_2 и B, B_2 , соответственно. Кроме того, кинематические пары A_1 и B_1 этих двухзвенников соединены между собой упругим элементом с коэффициентом жесткости k_3 и УПД реализуемым винтовым механизмом с приведенной массой гайки-маховика L [12].

В качестве внешних воздействий рассматриваются силовые факторы Q_1 и Q_2 в виде синфазных гармонических функций.

Положение твердого тела определяется координатами y_1 , y_2 и y_0 и φ , связанными между собой следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} y_0 &= ay_1 + by_2, \\ \phi &= c(y_2 - y_1), \\ y_1 &= y_0 - l_1\phi, \\ y_2 &= y_0 + l_2\phi, \end{aligned} \tag{1}$$

где $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}, b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}, c = \frac{1}{l_1 + l_2}$.

Предполагается, что система совершает малые колебания относительно положения статического равновесия.

Для решения задач оценки, контроля и формирования требуемых распределений амплитуд колебаний точек твердого тела по его длине воспользуемся методом структурного математического моделирования [13–15]. Необходимые выражения для определения кинетической и потенциальной энергий будут иметь следующий вид:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} J \dot{\phi}_0^2 + \frac{1}{2} L (b_1 \dot{y}_1 + b_2 \dot{y}_2)^2; \quad (2)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1y_1^2 + \frac{1}{2}k_2y_2^2 + \frac{1}{2}k_3(b_1y_1 + b_2y_2)^2, \quad (3)$$

где L – приведенная масса УПД; b_1 и b_2 – геометрические параметры (при $l = l_i$ ($i = 3, 6$) и $\varphi_1 = \varphi_2$, тогда $b_1 = b_2 = tg\varphi_1$).

Уравнения движения системы (после соответствующих преобразований) запишем в операторной форме:

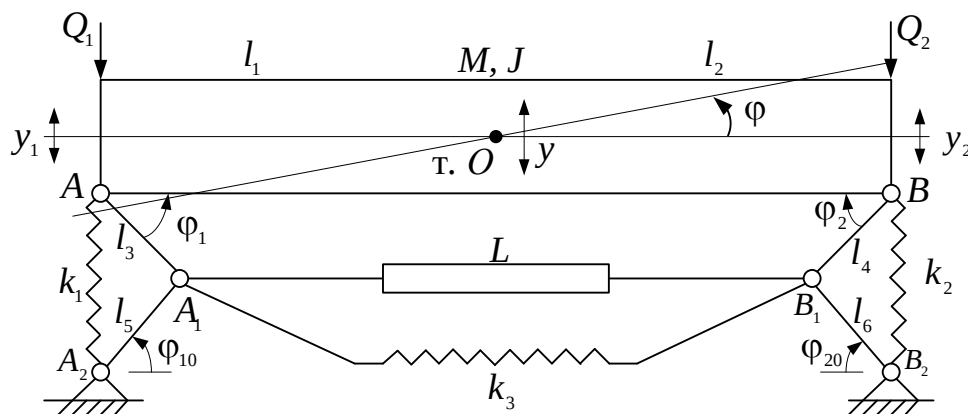


Рис. 1. Расчетная схема технического объекта в виде механической колебательной системы с дополнительными связями

Fig. 1. Analytical model of a technical object in the form of a mechanical oscillatory system with additional ties

$$\bar{y}_1(Ma^2 + Jc^2 + Lb_1^2)p^2 + \bar{y}_1(k_1 + k_3b_1^2) - [(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2]\bar{y}_2 = \bar{Q}_1; \quad (4)$$

$$\bar{y}_s(Mb^2 + Jc^2 + Lb_s^2)p^2 + \bar{y}_s(k_s + k_b b_s^2) - [(Jc^2 - Mab - Lb_s b_s)p^2 - k_s b_s b_s] \bar{y}_1 = \bar{Q}_s, \quad (5)$$

где $p = d/dt$ – оператор Лапласа; знак «—» над переменной означает ее изображение по Лапласу.

На основании (4) и (5) получим структурную математическую модель колебательной конструкции в виде схемы, эквивалентной в динамическом отношении системе автоматического управления, которая показана на рис. 2.

Структурная схема, изображенная на рис. 2, в действительности является математической моделью в виде некоторого графического аналога системы дифференциальных уравнений в операторной форме, где $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$) является комплексной переменной. Как видно из этой схемы, связь между парциальными подсистемами определяется элементом с передаточной функцией, равной

$$W_{\text{пар}}(p) = (Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2, \quad (6)$$

которая будет зависеть не только от пара-

метров исходной колебательной системы, но и от параметров дополнительных связей k_3 , b_1 , b_2 и L , что открывает более широкие возможности управления ее динамическим состоянием.

На основе структурной схемы введем в рассмотрение передаточные функции по внешним силовым возмущениям $\bar{Q}_1$ и $\bar{Q}_2$, полагая, что они связаны между собой соотношением

$$\bar{Q}_2 = \alpha \cdot \bar{Q}_1, \quad (7)$$

где α – коэффициент связности между внешними возмущениями.

Исследование динамических свойств колебательной системы с дополнительными связями (при одновременном действии двух силовых факторов $\bar{Q}_1$ и $\bar{Q}_2$) может быть выполнено с помощью передаточных функций, связывающих координаты $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ с силовыми воздействиями:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{(Mb^2 + Jc^2 + Lb_2^2)p^2 + k_2 + k_3b_2^2 + \alpha[(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2]}{A(p)}, \quad (8)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_2} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2 + Lb_1^2)p^2 + k_1 + k_3b_1^2] + [(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2]}{A(p)}, \quad (9)$$

в которых выражение

$$A(p) = [(Ma^2 + Jc^2 + Lb_1^2)p^2 + k_1 + k_3b_1^2][(Mb^2 + Jc^2 + Lb_2^2)p^2 + k_2 + k_3b_2^2] - [(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2]^2 \quad (10)$$

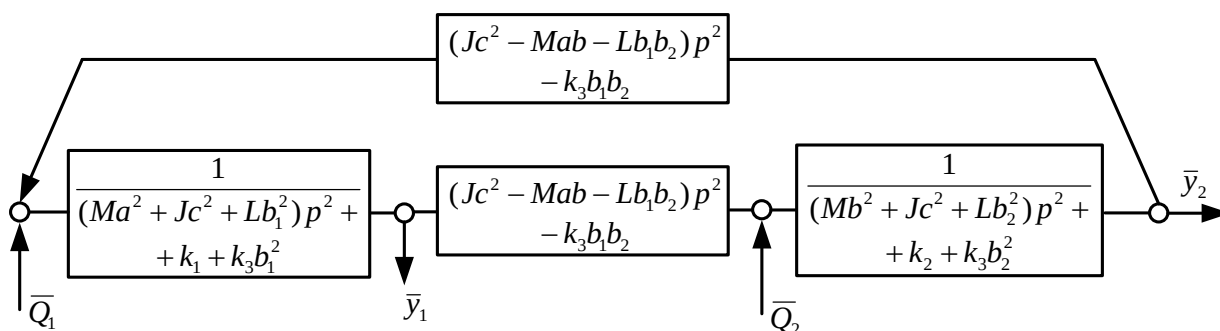


Рис. 2. Структурная математическая модель колебательной системы (рис. 1)
Fig. 2. Structural mathematical model of an oscillatory system (fig. 1)



является частотным характеристическим уравнением системы.

На основе выражений (8) и (9)

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{\alpha[(Ma^2 + Jc^2 + Lb_1^2)p^2 + k_1 + k_3b_1^2] + [(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2]}{(Mb^2 + Jc^2 + Lb_2^2)p^2 + k_2 + k_3b_2^2 + \alpha[(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)p^2 - k_3b_1b_2]} = i. \quad (11)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведем исследование динамических свойств колебательной системы на основе полученных передаточных функций.

Из выражений (8) и (9) следует, что колебательная система по координатам $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ может иметь по одному режиму динамического гашения колебаний на частотах, определяемых зависимостями:

$$\omega_{1дин}^2 = \frac{k_2 + k_3b_2^2 - \alpha k_3b_1b_2}{Mb^2 + Jc^2 + Lb_2^2 + \alpha(Jc^2 - Mab - Lb_1b_2)}; \quad (12)$$

$$\omega_{2дин}^2 = \frac{\alpha(k_1 + k_3b_1^2) - k_3b_1b_2}{\alpha(Ma^2 + Jc^2 + Lb_1^2) + Jc^2 - Mab - Lb_1b_2}. \quad (13)$$

Если режим динамического гашения колебаний реализуется по координате $\bar{y}_1$ на частоте (12), то распределение амплитуд колебаний по длине твердого тела ($l_1 + l_2$) будет происходить по прямой линии, которая (условно) является гипотенузой прямоугольного треугольника с катетами y_2 и $(l_1 + l_2)$. Аналогичное распределение амплитуд колебаний точек протяженного твердого тела длиной $l_1 + l_2$ можно получить при динамическом гашении колебаний по координате $\bar{y}_2$.

Частота, при которой числитель и знаменатель в выражении (11) будут равны друг другу, т.е. $W_{12}(p) = 1$, определится выражением

$$\omega_1^2 = \frac{\alpha k_1 - k_2 + k_3(b_1 + b_2)(\alpha b_1 - b_2)}{M(\alpha a - b) + L(b_1 + b_2)(\alpha b_1 - b_2)}. \quad (14)$$

найдем передаточную функцию межпарциальной связи между координатами $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$

При частоте колебаний рабочего органа, определяемой выражением (14), амплитуды колебаний всех его точек будут равны, т.е. «узел колебаний» будет находиться в бесконечности, что означает реализацию только поступательных вертикальных колебаний рабочего органа, которые обеспечиваются набором параметров, из них наибольший интерес для настройки представляют коэффициент связности (α), коэффициент жесткости (k_3) и приведенная масса (L) устройства преобразования движения.

Действие двух сил $\bar{Q}_1$ и $\bar{Q}_2$ можно заменить одной силой $\bar{Q}_0$, приложенной в т. E , как показано на рис. 3, в соответствии с выражениями:

$$Q_1 = Q_0 \cdot (a + d), \quad (15)$$

$$Q_2 = Q_0 \cdot (b - d). \quad (16)$$

В этом случае коэффициент связности α определится следующим соотношением:

$$\alpha = \frac{l_1 - l_0}{l_2 + l_0}. \quad (17)$$

Если т. E будет находиться справа от т. O (т.е. $0 < l_0 < l_2$), то коэффициент связности

$$\alpha = \frac{l_1 + l_0}{l_2 - l_0}. \quad (18)$$

На рис. 4 приведен график зависимости коэффициента связности α от расстояния l_0 при различных положениях точки приложения силы $\bar{Q}_0$.

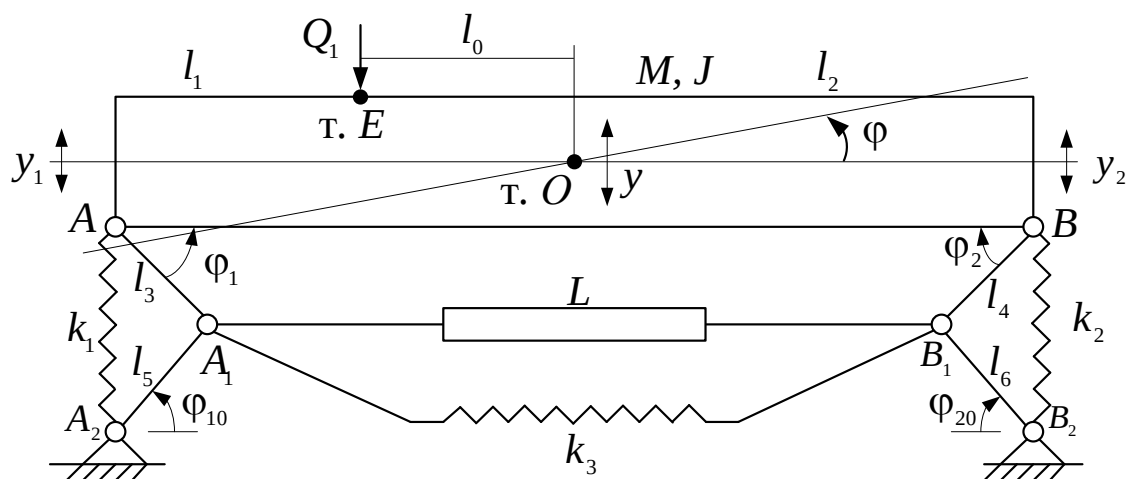
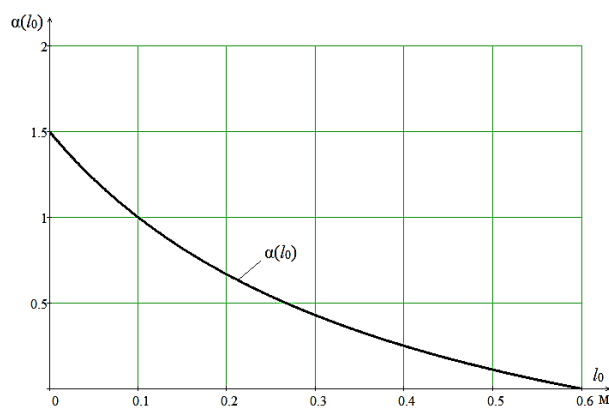
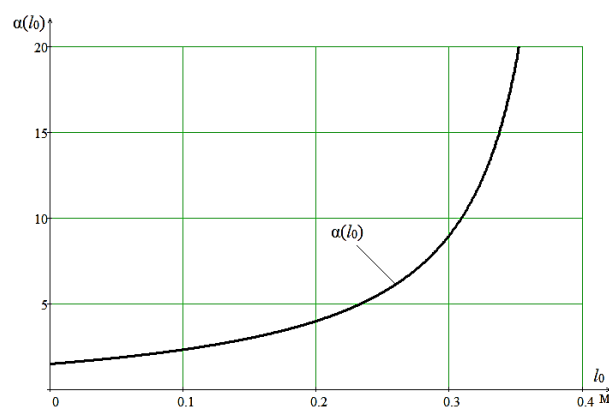


Рис. 3. Расчетная схема при действии одного силового фактора $\bar{Q}_0$, приложенного в т. E

Fig. 3. Analytical model under the action of a single force factor $\bar{Q}_0$ applied to the point E



a



b

Рис. 4. Графики зависимости коэффициента связности α от расстояния l_0 :

a – случай, когда т. E левее т. (O); b – случай, когда т. E правее т. (O)

Fig. 4. Coupling coefficient α vs distance l_0 graphs:

a – case when the point E is to the left of the point (O); b – case when the point E is to the right of the point (O)

Из выражения (11), к примеру, можно найти частоту для определения коэф-

фициента α и других параметров системы

$$\omega_i^2 = \frac{\alpha k_1 - i k_2 + k_3(b_1 + i b_2)(\alpha b_1 - b_2)}{M(\alpha a - b)(a + i b) + J c^2(\alpha + 1)(1 - i) + L(b_1 + i b_2)(\alpha b_1 - b_2)}. \quad (19)$$

Для исследования влияния параметров дополнительных связей на коэффициент связности координат $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ ($i = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}$) было проведено численное моделирование выражения (19) при следующих

параметрах колебательной системы: $M = 1000$ кг; $J = 80$ кг·м²; $L = (10, 50)$ кг; $l_1 = 0.6$ м; $l_2 = 0.4$ м; $l_0 = (0.1, 0.2, 0.3)$ м; $b_1 = b_2 = 1$; $k_1 = 20000$ Н/м; $k_2 = 15000$ Н/м; $k_3 = (10, 20, 30) \cdot 10^3$ Н/м. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

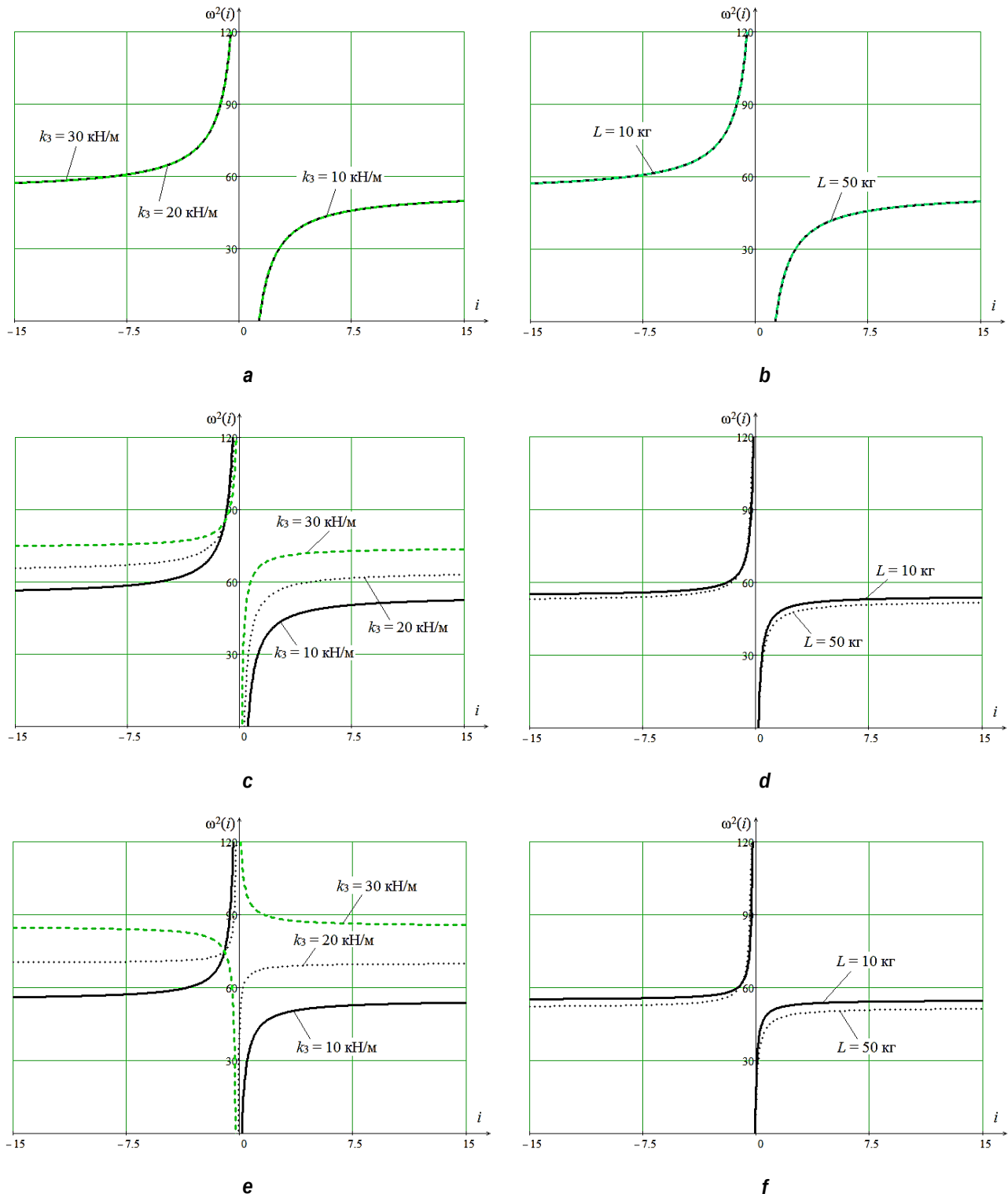


Рис. 5. Графики зависимости частоты от параметра i : а – при $l_0 = 0.1$ м, $L = 10$ кг, $k_3 = (10, 20, 30) \cdot 10^3$ Н/м; б – при $l_0 = 0.1$ м, $k_3 = 10000$ Н/м, $L = (10, 50)$ кг; в – при $l_0 = 0.2$ м, $L = 10$ кг, $k_3 = (10, 20, 30) \cdot 10^3$ Н/м; д – при $l_0 = 0.2$ м, $k_3 = 10000$ Н/м, $L = (10, 50)$ кг; е – при $l_0 = 0.3$ м, $L = 10$ кг, $k_3 = (10, 20, 30) \cdot 10^3$ Н/м; ф – при $l_0 = 0.3$ м, $k_3 = 10000$ Н/м, $L = (10, 50)$ кг

Fig. 5. Frequency vs parameter i graphs: а – at $l_0 = 0.1$ m, $L = 10$ kg, $k_3 = (10, 20, 30) \cdot 10^3$ N/m; б – at $l_0 = 0.1$ m, $k_3 = 10000$ N/m, $L = (10, 50)$ kg; в – at $l_0 = 0.2$ m, $L = 10$ kg, $k_3 = (10, 20, 30) \cdot 10^3$ N/m; д – at $l_0 = 0.2$ m, $k_3 = 10000$ N/m, $L = (10, 50)$ kg; е – at $l_0 = 0.3$ m, $L = 10$ kg, $k_3 = (10, 20, 30) \cdot 10^3$ N/m; ф – at $l_0 = 0.3$ m, $k_3 = 10000$ N/m, $L = (10, 50)$ kg

Приведенные графики дают представление о влиянии параметров дополнительных связей на динамическое состояние колебательной системы и их возможностях по управлению этим состоянием, в т.ч. для получения однородной структуры вибрационного поля, независящего от частоты силовых возмущений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода структурного математического моделирования и аппарата передаточных функций исследовано влияние межпарциальных связей на динамические свойства механической колебательной системы с двумя степенями свободы с дополнительными связями в виде винтового и рычажных механизмов. Получены аналитические соотношения между параметрами исходной колебательной системы и вспо-

могательными связями, обеспечивающими необходимые динамические состояния технологической машины, в т.ч. и получение однородного вибрационного поля, независящего от частоты силовых возмущений. Показано, что использование дополнительных связей расширяет возможности целенаправленного формирования требуемой структуры вибрационного поля технологической машины. Численным моделированием динамики колебательной системы продемонстрировано влияние параметров добавочных связей на динамическое состояние системы и их возможности по управлению этим состоянием. Предлагаемый подход может быть использован, в частности, для определения рациональных параметров вибрационного технологического оборудования различного назначения без изготовления его опытных образцов и проведения натурных испытаний.

Библиографический список

1. Harris S.M., Piersol A.G. Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw Hill Book Co, 2002. 1457 p.
2. Silva C.W. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, DC: CRC Press, 2000. 957 p.
3. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of vibration protection. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 708 p.
4. Rocard Y. Dynamique generale des vibrations. Paris: Masson, 1949. 179 p.
5. Banakh L., Kempner M. Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure, Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. 262 p.
6. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: Изд. Дом «Руда и Металлы», 2013. 640 с.
7. Коловский М.З. Автоматическое управление виброзащитными системами. М.: Наука, 1976. 320 с.
8. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных технологий, 2006. 176 с.
9. Ганиев Р.Ф., Кононенко В.О. Колебания твердых тел. М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1976. 432 с.
10. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.
11. Вьюнг К.Ч., Ковригина И.В., Елисеев С.В. Механизмы в структуре механической колебательной системы: возможности формирования динамических состояний // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 13–18. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-13-18
12. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2008. 523 с.
13. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск: Наука, 2016. 459 с.
14. Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи). Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2018. 692 с.
15. Елисеев А.В., Сельвинский В.В., Елисеев С.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неустойчивых связей. Новосибирск: Наука, 2015. 332 с.

References

1. Harris S.M., Piersol A.G. Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw Hill Book Co, 2002, 1457 p.
2. Silva C.W. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, DC: CRC



Press, 2000, 957 p.

3. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of vibration protection. Switzerland: Springer International Publishing, 2016, 708 p.

4. Rocard Y. Dynamique generale des vibrations. Paris: Masson, 1949, 179 p.

5. Banakh L., Kempner M. Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure, Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. 262 p.

6. Blekhman I.I. *Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika* [The theory of vibration processes and devices. Vibration mechanics and vibration equipment]. Saint-Petersburg: Publishing house "Ruda i Metally", 2013, 640 p. (In Russ.).

7. Kolovsky M.Z. *Avtomaticheskoe upravlenie vibrozashchitnymi sistemami* [Automatic control of vibration protection systems]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 320 p. (In Russ.).

8. Panovko G.Ya. *Dinamika vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Dynamics of vibration technological processes]. Moscow–Izhevsk: Research Center "Regular and chaotic dynamics". Institute of Computer Technologies Publ., 2006, 176 p. (In Russ.).

9. Ganiev R.F. *Kolebaniya tverdykh tel* [Oscillations of solids]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 432 p. (In Russ.).

10. Vaisberg L.A. *Proektirovanie i raschet vibratsionnykh grokhotov* [Design and calculation of vibrating screens]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 144 p. (In Russ.).

11. Vuong Q.T. Kovrigina I.V., Eliseev S.V. Mechanisms in the structure of a mechanical oscillatory sys-

tem: possibilities of forming dynamic states. *Systemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 3 (39), pp. 13–18. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-13-18

12. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Homenko A.P., Zasyadko A.A. *Dinamicheskiy sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob'ektov* [Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration insulation of engineering objects]. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2008, 523 p. (In Russ.).

13. Eliseev S.V., Artyunin A.I. *Prikladnaya teoriya kolebaniy v zadachakh dinamiki lineinykh mekhanicheskikh sistem* [Applied oscillation theory in the problems of linear mechanical system dynamics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2016, 459 p. (In Russ.).

14. Eliseev S.V. *Prikladnoy sistemnyy analiz i strukturnoe matematicheskoe modelirovanie (dinamika transportnykh i tekhnologicheskikh mashin: svyaznost' dvizheniy, vibratsionnye vzaimodeystviya, ryuchazhnye svyazi)* [Applied system analysis and structural mathematical modeling (dynamics of transport and technological machines: movement connectivity, vibrational interactions, linkages)]. Irkutsk: Irkutsk State Transport University Publ., 2018, 692 p. (In Russ.).

15. Eliseev A.V., Sel'vinski V.V., Eliseev S.V. *Dinamika vibratsionnykh vzaimodeystviy elementov tekhnologicheskikh sistem s uchetom neuderzhivayushikh svyazei* [Dynamics of vibration interactions of technological system elements with regard to unilateral constraints]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2015, 332 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Елисеев А.В., Вьонг Куанг Чык заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Eliseev S.V., Kuznetsov N.K., Eliseev A.V., Vuong Quang Truc declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Елисеев Сергей Викторович,

доктор технических наук, профессор,
советник при ректорате по научной работе,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: eliseev_s@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergei V. Eliseev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Advisor of the University Administration
for Scientific Research,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: eliseev_s@inbox.ru

Кузнецов Николай Константинович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и стандартизации в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: knik@istu.edu

Елисеев Андрей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры математики,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
✉ e-mail: eavsh@ya.ru

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

Nikolai K. Kuznetsov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Design
and Standardization in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: knik@istu.edu

Andrei V. Eliseev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Mathematics,
Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St.,
Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: e-mail: eavsh@ya.ru

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9.02

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-699-709>

Влияние дисбаланса инструментальных наладок на качество обработанной поверхности при концевом фрезеровании

© А.Ю. Николаев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – определение модели зависимости шероховатости поверхности от точности балансировки инструментальной наладки и технологических параметров процесса концевой фрезерования. Исследования базируются на научных основах технологии машиностроения и резании материалов, математического моделирования, активного эксперимента. Научные данные получены с помощью таких приборов как контактный профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200, балансировочная машина Haimer TD2009 Comfort Plus, динамометрический комплекс Kistler 9253B23, аппаратно-программный комплекс для модального анализа CutPro, устройство для измерения инструмента вне станка Zoller Genius 3. Разработана математическая модель, отражающая влияние режимов резания и величины остаточного дисбаланса инструментальной наладки на качество обработанной поверхности. Выполнены регрессионный анализ и анализ остатков представленной модели, подтверждающие правильность ее работы. Получены поверхности отклика шероховатости обработанной поверхности от остаточного дисбаланса. В качестве факторов были выбраны следующие параметры процесса обработки: дисбаланс инструментальной наладки, подача, глубина и ширина фрезерования. Определена степень влияния каждого учтенного в работе фактора. Выявлены расчетные и экспериментальные данные, указывающие на низкую долю влияния точности балансировки инструментальной наладки на шероховатость обработанной поверхности; незначительное ухудшение состояния поверхности наблюдалось лишь при превышении допусков на качество балансировки в несколько раз, тем не менее, даже при максимальных значениях фактора x_1 качество поверхности соответствует поверхности после чистового фрезерования.

Ключевые слова: балансировка, инструментальная наладка, регрессионный анализ, режимы резания, моделирование фрезерования, чистовое фрезерование

Информация о статье: Дата поступления 03 июня 2019 г.; дата принятия к печати 04 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Николаев А.Ю. Влияние дисбаланса инструментальных наладок на качество обработанной поверхности при концевом фрезеровании. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):699–709. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-699-709

Effect of tool setup imbalance on machined surface quality at end milling

A.Yu. Nikolaev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to determine the model of surface roughness dependence on tool setup balancing accuracy and technological parameters of end milling. The research is based on the scientific foundations of the technology of engineering and cutting materials, mathematical modeling and active experiment. Scientific data are obtained using the following devices: a contact profilometer Taylor Hobson Form Talysurf i200, a balancing machine Haimer TD2009 Comfort Plus, a dynamometric complex Kistler 9253B23, a hardware and software complex CutPro for modal analysis, a device for tool measurement outside the machine-tool Zoller Genius 3. A mathematical model has been developed that reflects the effect of cutting modes and the value of toolset residual imbalance on surface quality. The performed regression analysis and the analysis of the model residuals confirm the correctness of model work. The surfaces of machined surface roughness response from the residual imbalance are obtained. The following machining parameters are chosen to be the factors: imbalance of the tool setup, feed, milling depth and width. The influence degree of each factor taken into account in the work is determined. The calculated and experimental data indicating the low influence of tool setup balancing accuracy on machined surface roughness are revealed. The only case when a slight deterioration of the surface state is observed is when the tolerances for balancing quality are exceeded several times. However, the surface quality corresponds to the surface after finish milling even at the maximum values of the factor x_1 .

Keywords: balancing, tool setup, regression analysis, cutting modes, milling modeling, finish milling

Information about the article: Received June 03, 2019; accepted for publication July 04, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Nikolaev A.Yu. Effect of tool setup imbalance on machined surface quality at end milling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):699–709. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-699-709

1. ВВЕДЕНИЕ

К актуальным задачам современного машиностроительного производства относятся повышение эффективности работы современных металлообрабатывающих станков и комплексов, переход на высокопроизводительные технологии обработки, повышение качества выпускаемой продукции. Современное металлорежущее оборудование работает в условиях увеличивающихся скоростей и динамических нагрузок, приводящих к колебаниям в технологической системе, что негативно сказывается на его техническом состоянии, надежности процесса резания и, следовательно, качестве обработанных деталей.

Одним из возможных путей повышения качества механообработки считается понижение вибраций, которые являются неизменным спутником любого процесса механической обработки, в частности – фрезерования. В работах [1–5] авторами исследуется процесс фрезерования с применением концевой твердосплавной инструмента. Выделяют три основные группы вибраций в зависимости от источника.

1. Вибрации сочлененной технической упорядоченности, связанные с наличием соединений и кинематических связей между элементами этой системы, такими как станок, приспособление, инструмент, деталь.

2. Термомеханические вибрации, возникающие в зоне резания, связанные с температурными деформациями заготовки, стружки и режущей части инструмента. В работах [6–8] авторами рассматриваются влияние нагрева на структуру и свойства инструментальных материалов, остаточные напряжения в режущей кромке инструмента.

3. Регенеративные вибрации. При фрезеровании каждый зуб фрезы, совер-

шая колебания, оставляет за собой волнистую поверхность заготовки, и в результате каждый последующий зуб срезает слой заготовки переменной толщины, что, в свою очередь, приводит к осцилляциям силы резания и появлению регенеративных вибраций.

Нельзя однозначно говорить о том, какой тип вибраций оказывает решающее воздействие на процесс резания – это зависит от типа и условий обработки конкретной детали и подлежит тщательному анализу. Свести к минимуму вибрации, относящиеся к первой группе и связанные непосредственно с функционированием механической системы станка, можно при помощи балансировки шпинделя в целом. По объективным причинам балансировка шпинделя выполняется по отдельности: мотор-шпиндель в составе станка балансируется заводом-изготовителем, а инструментальная наладка – непосредственно пользователем.

Балансировка вращающегося инструмента – сравнительно новая практика в машиностроении. Несмотря на общую тривиальность процесса, многие его нюансы до сих пор не вполне ясны. В частности, нет единого мнения о том, какими требованиями и нормативными документами следует руководствоваться при балансировке инструмента, на что и в какой степени влияет остаточный дисбаланс инструментальной наладки, насколько хорошо должен быть уравновешен конкретный инструмент для выполнения тех или иных задач.

Исходя из опыта изготовления и входного контроля инструментальных патронов для высокоскоростной обработки, на многих предприятиях испытывают сомнения относительно рационального и реального качества балансировки. Причина этих сомнений состоит в противоречии



между качеством балансировки, указываемом изготовителем в протоколе приемки, и измеренном потребителем при входном контроле. Возникает вопрос: насколько правильно и воспроизводимо путем измерений или проверок требуемое в конструкторских спецификациях качество балансировки G2,5 (согласно стандарту ISO 1940-1¹) и, тем самым, насколько рационально его назначение [9].

При подготовке инструмента к технологической операции, где будет применено высокоскоростное фрезерование, величина допустимого остаточного дисбаланса, выставляемая в качестве допуска для инструментальной наладки, может принимать очень малые или вовсе недостижимые на практике значения. Данная проблема связана с жесткой привязкой качества балансировки к рабочей частоте вращения инструмента, а также с особенностями эмпирических вычислений, в которых фигурирует масса инструментальной наладки. Следовательно, возникает необходимость пересмотра требований балансировки инструментальных наладок с целью сокращения времени и трудоемкости процесса подготовки инструмента к работе, но в то же время без потери качества обработки или уменьшении стойкости инструмента и срока службы шпинделя станка.

Анализ публикаций [10, 11] показал, что обеспечение наилучшего качества поверхности с сохранением высокой производительности процесса обработки возможно с использованием методов математического моделирования. Особого внимания заслуживают работы [12–14], однако авторами данных работ не учитывается дисбаланс инструментальных наладок, особенности используемых инструментальных систем и состояние системы в целом.

2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований являлось определение реальной зависимости шероховатости обработанной поверхности от качества балансировки инструментальной наладки, состоящей из концевой твердосплавной фрезы диаметром 16 мм и термоусадочного патрона Haimer A63.140.16, выполненного под инструментальную систему HSK (рис. 1 б). Выбор патрона обусловлен его высокой точностью, а также возможностью производить балансировку инструментальной оснастки при помощи балансировочных винтов. Радиальное биение, измеренное в работе [15], составляет 0,006 мм. Данное решение позволяет варьировать величину остаточного дисбаланса в пределах рабочего диапазона, не прибегая к разрушающим методам балансировки.

Исследование проводилось по дробному 4-факторному плану «Бокса-Бенкена» с тремя уровнями. В качестве исследуемого фактора для оценки влияния точности балансировки на шероховатость получаемой поверхности R_a была выбрана величина остаточного дисбаланса инструментальной наладки $U_{ост}$. Данный параметр универсален и позволяет определить качество балансировки инструмента вне зависимости от используемого стандарта. Также для сравнительной оценки полученных результатов в качестве дополнительных факторов были выбраны параметры, которые оказывают наибольшее влияние на шероховатость и процесс обработки в целом, а именно: подача f_z , ширина a_e и глубина a_p фрезерования.

Измерение сил и контроль вибраций проводились при попутном фрезеровании (рис. 1 а). За основу были взяты режимы резания, используемые на практике с учетом рекомендаций справочной литературы.

¹ГОСТ ISO 1940-1-2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса. Введ. Приказом Федерального агентства по техническому регламентированию и метрологии № 6-ст от 25.01.2008. М.: Стандартинформ, 2008. 22 с. / GOST ISO 1940-1-2007. Vibration. Quality requirements for balancing rigid rotors. Part 1. Permissible imbalance determination. Introduced by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 6-st of 25 January 2008. M.: Standartinform, 2008.22 p.

В последствие они были скорректированы по результатам проведенного модального анализа (табл. 1).

Эксперимент заключался в продольном фрезеровании уступов в алюминиевой заготовке из сплава 1933. Заготовка представляла собой блок размером 250*40*40 и закреплялась в тисках, установленных, в свою очередь, на стационарном динамометре Kistler 9253B23. Эксперимент проводился на станке HSC 75 linear. Шероховатость измерялась на контактном профилометре Taylor Hobson Form Talysurf i200. Величина остаточного дисбаланса контролировалась при помощи балансировочной машины Haimer TD2009 Comfort Plus.

Математическая модель шероховатости может быть представлена в виде уравнения регрессии степенного вида:

$$R_a = C_0 U_{\text{ост}}^a f_z^b a_p^c a_e^d, \quad (1)$$

где C_0 , a , b , c , d – параметры исследуемой модели.

Сведем выражение (1) к линейному виду:

$$\ln(R_a) = \ln(C_0) + a \ln(U_{\text{ост}}) + b \ln(f_z) + c \ln(a_p) + d \ln(a_e).$$

Произведем следующую замену:

$$\ln(R_a) = y; \ln(C_0) = b_0; a = b_1; b = b_2; c = b_3; d = b_4;$$

$$U_{\text{ост}} = x_1; f_z = x_2; a_p = x_3; a_e = x_4.$$

Получаем выражение:

$$y = b_0 + b_1.$$

Уравнение регрессии принимает соответствующий вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2.$$



a



b

Рис. 1. Проведение эксперимента: а – рабочая зона станка HSC75V; б – исследуемая инструментальная наладка, закрепленная в шпинделе станка
Fig. 1. Experiment running: a – working site of the machine-tool HSC75V linear; b – studied tool setup fixed in the machine-tool spindle

Таблица 1

Режимы резания

Table 1

Cutting modes

D_c , мм	z	V_c , м/мин	a_e , мм	a_p , мм	n , мин ⁻¹	f_z , мм/зуб	V_f , мм/мин
16	3	1256	10	2	25000	0,15	11250



Кодирование переменных осуществляется по следующим соотношениям:

$$x_1 = \frac{2(\ln U_{\text{ост}} - \ln U_{\text{ост.max}})}{\ln U_{\text{ост.max}} - \ln U_{\text{ост.min}}} + 1;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln f_z - \ln f_{z\text{max}})}{\ln f_{z\text{max}} - \ln f_{z\text{min}}} + 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln a_e - \ln a_{e\text{max}})}{\ln a_{e\text{max}} - \ln a_{e\text{min}}} + 1;$$

$$x_4 = \frac{2(\ln a_p - \ln a_{p\text{max}})}{\ln a_{p\text{max}} - \ln a_{p\text{min}}} + 1.$$

В табл. 2 приведены значения на уровне факторов эксперимента.

Верхний уровень $U_{\text{ост}}$ соответствует максимально допустимому дисбалансу для вращающегося инструмента. Нижний уровень $U_{\text{ост}}$ соответствует минимальной ве-

личине дисбаланса, реализуемой на практике для используемой инструментальной наладки.

На рис. 2 представлены результаты эксперимента.

В табл. 3 представлена матрица планирования эксперимента, а также его результаты.

3. АНАЛИЗ ОСТАТКОВ

Для проверки правильности работы модели был проведен анализ остатков. Анализ остатков – анализ разности фактических значений отклика и значений, предсказанных по уравнению регрессии. Для корректной работы должны быть соблюдены 2 основных правила:

1. Остатки нормально распределены.
2. Остатки не зависят от предсказанных по уравнению регрессии значений отклика.

Таблица 2

Уровни факторов эксперимента

Table 2

Experiment factor levels

Уровень фактора		Фактор			
		$U_{\text{ост}}$, ГММ	f_z , мм/зуб	a_e , мм	a_p , мм
x_{imax}	+1	14,7	0,15	10	2
x_{i0}	0	8,9	0,10	6	1,5
x_{min}	-1	3,7	0,05	2	1



a



b

Рис. 2. Результаты эксперимента: а – получаемая стружка; б – обработанная поверхность
Fig. 2. Experimental results: a – received chip; b – machined surface

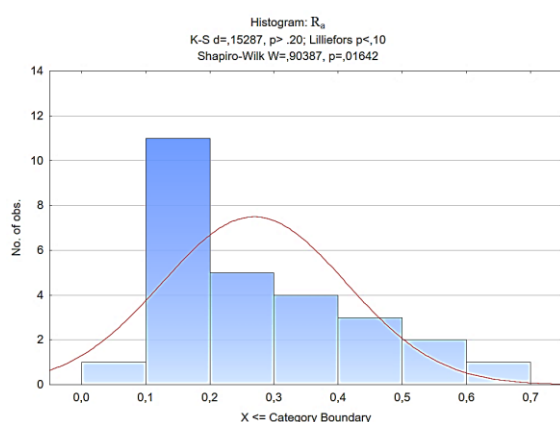
Таблица 3

Матрица планирования экспериментов

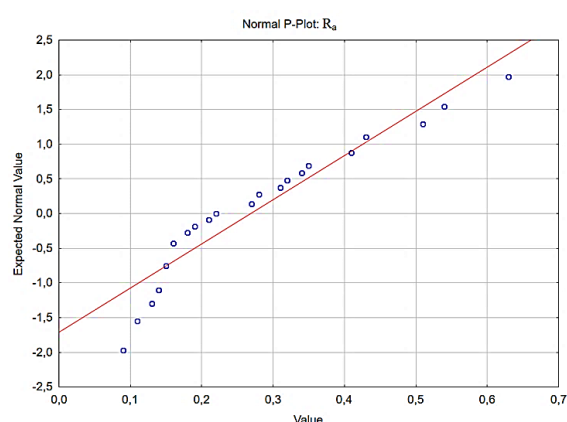
Table 3

Experiment planning matrix

№ опыта	X_1		X_2		X_3		X_4		R_a , мм
	код	$U_{осм}$, ГММ	код	f_z , мм/зуб	код	a_e , мм	код	a_p , мм	
1	-1	3,7	-1	0,05	0	6	0	1,5	0,09
2	1	14,7	-1	0,05	0	6	0	1,5	0,13
3	-1	3,7	1	0,15	0	6	0	1,5	0,32
4	1	14,7	1	0,15	0	6	0	1,5	0,43
5	0	8,9	0	0,1	-1	2	-1	1	0,16
6	0	8,9	0	0,1	1	10	-1	1	0,41
7	0	8,9	0	0,1	-1	2	1	2	0,35
8	0	8,9	0	0,1	1	10	1	2	0,51
9	0	8,9	0	0,1	0	6	0	1,5	0,15
10	-1	3,7	0	0,1	0	6	-1	1	0,15
11	1	14,7	0	0,1	0	6	-1	1	0,34
12	-1	3,7	0	0,1	0	6	1	2	0,16
13	1	14,7	0	0,1	0	6	1	2	0,27
14	0	8,9	-1	0,05	-1	2	0	1,5	0,11
15	0	8,9	1	0,15	-1	2	0	1,5	0,21
16	0	8,9	-1	0,05	1	10	0	1,5	0,28
17	0	8,9	1	0,15	1	10	0	1,5	0,41
18	0	8,9	0	0,1	0	6	0	1,5	0,15
19	-1	3,7	0	0,1	-1	2	0	1,5	0,31
20	1	14,7	0	0,1	-1	2	0	1,5	0,27
21	-1	3,7	0	0,1	1	10	0	1,5	0,19
22	1	14,7	0	0,1	1	10	0	1,5	0,54
23	0	8,9	-1	0,05	0	6	-1	1	0,18
24	0	8,9	1	0,15	0	6	-1	1	0,22
25	0	8,9	-1	0,05	0	6	1	2	0,14
26	0	8,9	1	0,15	0	6	1	2	0,63
27	0	8,9	0	0,1	0	6	0	1,5	0,15



a



b

Рис. 3. Анализ остатков: а – частотная гистограмма; б – нормально-вероятностный график
 Fig. 3. Residual analysis: a – frequency histogram; b – normal probabilistic graph



Для проверки первого правила рассмотрим частотную гистограмму и нормально-вероятностный график остатков на рис. 3 а и b, соответственно.

Частотная гистограмма обладает унимодальным распределением с относительно небольшой положительной асимметрией. Фактические значения не систематически отклоняются от теоретической нормальной прямой, соответственно, гипотеза о нормальности остатков не отклоняется.

Для проверки второго правила рассмотрим диаграмму рассеяния на рис. 4.

На диаграмме рассеяния не наблюдается определенной систематичности в расположении точек (реальных значений),

что говорит об отсутствии зависимости остатков от предсказанных по уравнению регрессии значений отклика.

4. МНОЖЕСТВЕННЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ И ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТКЛИКА

Множественная регрессия позволяет определять наилучшего предиктора исследуемого процесса. На рис. 5 представлены результаты регрессионного анализа полученных данных. Анализ и построение поверхностей отклика, представленных на рис. 6, выполнены в программе STATISTICA 10.0.

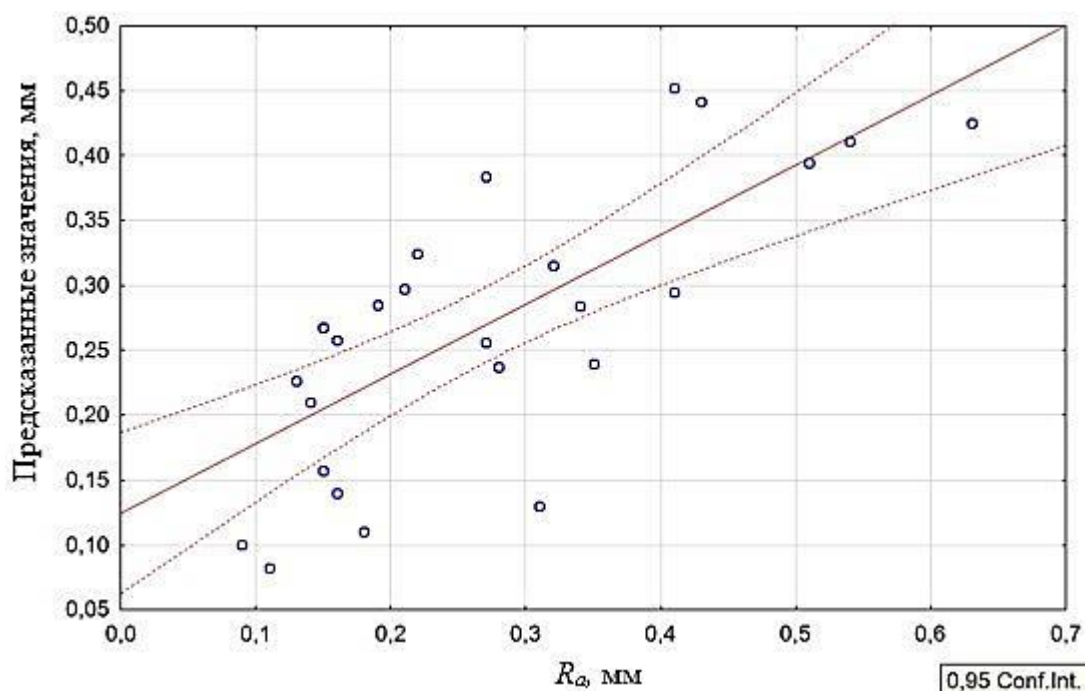


Рис. 4. Диаграмма рассеяния
Fig. 4. Scattergram

Multiple Regression Results					
Dependent: Ra	Multiple R =	,73293991	F =	6,384207	
	R ² =	,53720091	df =	4,22	
No. of cases: 27	adjusted R ² =	,45305562	p =	,001441	
	Standard error of estimate:	,106311404			
Intercept: -,316010909	Std.Error:	,1315986	t(22) =	-2,401	p = ,0252
Uocm b* = ,298	fz b* = ,508	ae b* = ,366			
ap b* = ,236					

Рис. 5. Результаты множественного регрессионного анализа
Fig. 5. Results of multiple regression analysis

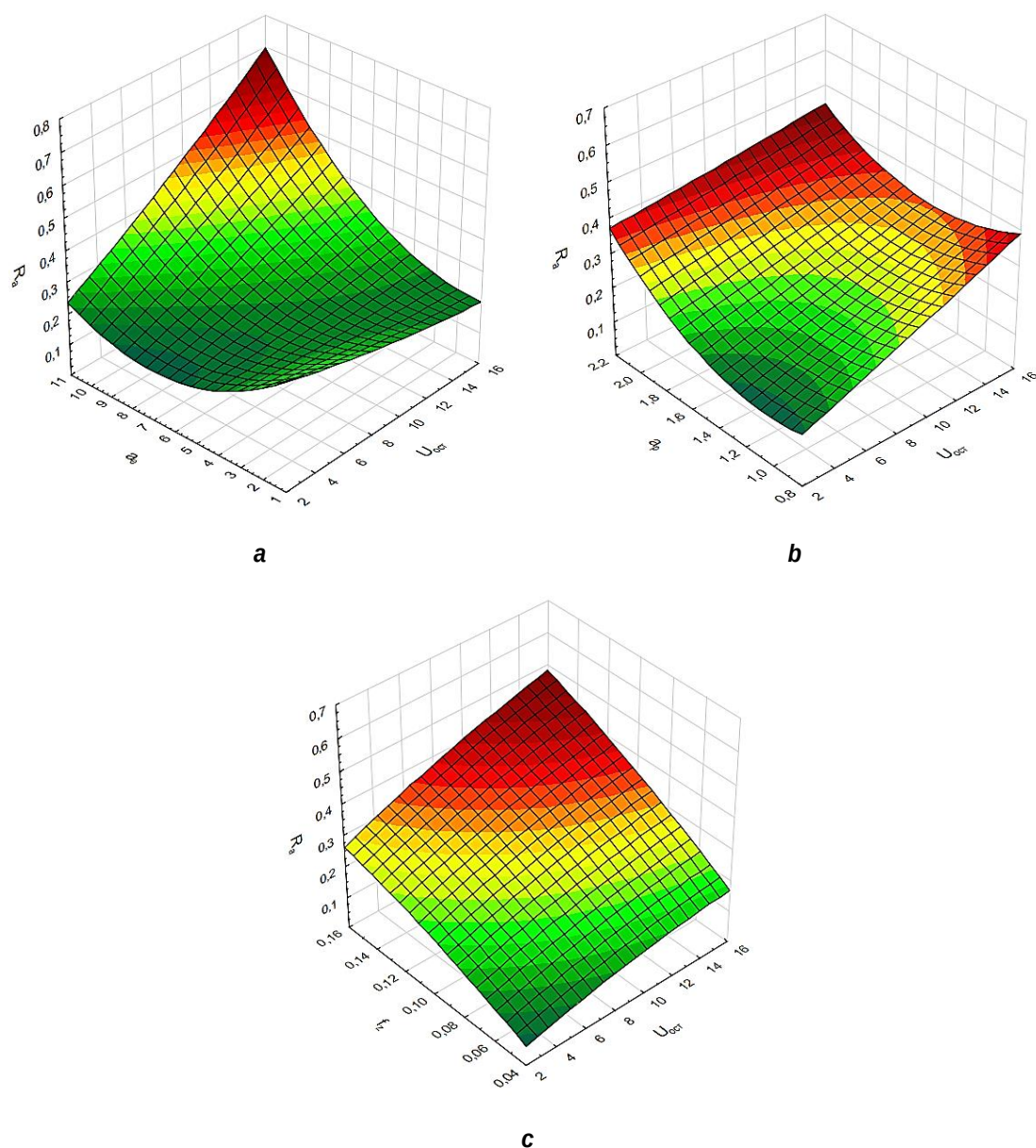


Рис. 6. Поверхности отклика шероховатости обработанной поверхности от остаточного дисбаланса: а – зависимость параметра R_a от U_{ocm} и a_e ; б – зависимость параметра R_a от U_{ocm} и a_p ; в – зависимость параметра R_a от U_{ocm} и f_z

Fig. 6. Roughness response surfaces of the machined surface from the residual imbalance: а – 3D surface plot of R_a against U_{ocm} and a_e ; б – 3D surface plot of R_a against U_{ocm} and a_p ; в – 3D surface plot of R_a against U_{ocm} and f_z

Анализ полученных результатов эксперимента позволяет сделать выводы, что увеличение подачи на зуб f_z приводит к увеличению шероховатости, а остальные параметры влияют неоднозначно. На стадии проведенного регрессионного анализа видно, что величина остаточного дисбаланса (а это фактор, который определяет влияние качества балансировки на шероховатость обработанной поверхности) в процессе расчета был определен програм-

мой как фактор, не оказывающий существенного влияния, аналогичную картину мы можем наблюдать и на полученных поверхностях отклика.

Согласно [16, 17], сама же расчетная модель может считаться адекватной, что видно по величине коэффициента уровня значимости «р», который должен быть $< 0,05$, а также коэффициенту детерминации «R», который должен быть $> 0,3$,



т.е. изменение отклика происходит под воздействием учтенных в модели факторов. Данные коэффициенты показывают долю изменяемости отклика, происходящую под одновременным воздействием всех факторов. Другими словами, результаты регрессионного анализа говорят об адекватном подборе факторов, а также о целесообразности прогнозов по данной модели.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты.

1. Разработана математическая модель, отражающая влияние режимов рез-

ния и величины остаточного дисбаланса инструментальной наладки на качество обработанной поверхности.

2. Выполнены регрессионный и анализ остатков представленной модели, подтверждающие ее работоспособность.

3. Расчетные и экспериментальные данные говорят о низкой доли влияния точности балансировки инструментальной наладки на шероховатость обработанной поверхности. Незначительное ухудшение состояния поверхности наблюдалось лишь при превышении допусков на качество балансировки в несколько раз. Тем не менее даже при максимальных значениях фактора x_1 качество поверхности соответствует поверхности после чистового фрезерования.

Библиографический список

1. Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: working surface description approach // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. No. 6. P. 158–175. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-269

2. Khramov A., Kiselev E., Leksin E. The high-performance machining of the curved surfaces with the progressive cutting geometry of the end mill // MATEC Web of Conference (07 November 2017). 2017. Vol. 129. P. 4. DOI:10.1051/mateconf/201712901057

3. Bobyr M., Luneva M., Yakushev A. An algorithm for controlling of cutting speed based on soft calculations. MATEC Web of Conference (Sevastopol, 11–15 September, 2017). 2017. Vol. 129. P. 7–9. DOI:10.1051/mateconf/201712901064

4. Voronov S.A., Kiselev I.A. Cutting process modeling geometric algorithm 3MZBL: Algorithm of surface modification and instantaneous chip thickness determination // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. No. 6. P. 70–83. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-261

5. Voronov S.A., Kiselev I.A., Arshinov S.V. Dynamics numerical simulation application procedure of multi-axis die-milling at process design // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. No. 6. P. 50–66. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-260

6. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P., Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatyh A.S. Research Results Of Stress-Strain State Of Cutting Tool When Aviation Materials Turning // Journal of physics: Conference series: XI International scientific and technical conference (Omsk, 14–16 November 2017 г). Omsk, 2017. Vol. 944. P. 012104. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012104 Information on <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012104/meta>

7. Nikolaeva E.P., Vlasov D.B. Effect of heat treatment conditions on structure and properties of high-speed

steel // IOP series: Materials science and engineering: X International conference on mechanical engineering, Automation and control systems 2016, Meacs 2016 (Tomsk, 27–29 October 2016). Tomsk, 2017. Vol. 177 P. 012113. DOI:10.1088/1757-899X/177/1/012113 EID: 2-s2.0-85016178504

8. Николаева Е.П., Никулин Д.С. Применение инновационных средств для контроля качества инструмента из быстрорежущих сталей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 2 (50). С. 73–80.

9. Савилов А.В., Николаев Д.Ю., Николаев А.Ю. Исследование влияния дисбаланса инструментальных наладок на выходные показатели фрезерования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 7 (102). С. 81–91.

10. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6–2. С. 476–479.

11. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа // Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1–2. С. 42–46.

12. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.

13. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2. С. 211–216.

14. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процесса сверления // Системы. Методы. Технологии. 2016.

№ 2 (30). С. 69–73. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-69-73

15. Пятых А.С. Исследование зажимных патронов для сверления точных отверстий // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). С. 70–74. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-4-70-74

16. Регрессионный анализ результатов однофак-

торного эксперимента [Электронный ресурс]. URL: http://libraryno.ru/2-6-regressionnyy-analiz-rezultatov-odnofaktornogo-eksperimenta-osn_plan_exp/ (03.05.2019)

17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

References

1. Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: working surface description approach. Engineering Journal: Science and Innovation, 2012, no. 6, pp. 158–175. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-269
2. Khramov A., Kiselev E., Leksin E. The high-performance machining of the curved surfaces with the progressive cutting geometry of the end mill. MATEC Web of Conference (07 November 2017). 2017, vol. 129, p. 4. DOI:10.1051/mateconf/201712901057
3. Bobyr M., Luneva M., Yakushev A. An algorithm for controlling of cutting speed based on soft calculations. MATEC Web of Conference [Sevastopol, 11–15 September 2017]. Sevastopol, 2017, vol. 129, pp. 7–9. DOI:10.1051/mateconf/201712901064
4. Voronov S.A., Kiselev I.A. Cutting process modeling geometric algorithm 3MZBL: Algorithm of surface modification and instantaneous chip thickness determination. Engineering Journal: Science and Innovation, 2012, no. 6, pp. 70–83. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-261
5. Voronov S.A., Kiselev I.A., Arshinov S.V. Dynamics numerical simulation application procedure of multi-axis die-milling at process design // Engineering Journal: Science and Innovation. 2012. No. 6. P. 50–66. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-260
6. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P., Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatykh A.S. Research Results Of Stress-Strain State Of Cutting Tool When Aviation Materials Turning. Journal of physics: Conference series: XI International scientific and technical conference [Omsk, 14–16 November 2017]. Omsk, 2017, vol. 944, p. 012104. (In Russ.) DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012104 Information on <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012104/meta>
7. Nikolaeva E.P., Vlasov D.B. Effect of heat treatment conditions on structure and properties of high-speed steel // Iop conference series: Materials science and engineering: X International conference on mechanical engineering, Automation and control systems 2016, Meacs 2016 [Tomsk, 27–29 October 2016]. Tomsk, 2017, vol. 177, p. 012113. (In Russ.) DOI:10.1088/1757-899X/177/1/012113 EID: 2-s2.0-85016178504
8. Nikolaeva E.P., Nikulin D.S. The application of innovative means for quality control of the high-speed steel tools. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Mod-*

- elirovanie* [Modern Technologies. System analysis. Modeling], 2016, no. 2 (50), pp. 73–80. (In Russ.).
9. Savilov A.V., Nikolaev D.Yu., Nikolaev A.Yu. Study of instrumental adjustment imbalance effect on milling output parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, vol. 7 (102), pp. 81–91. (In Russ.).
10. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. The modern methods of optimization the high productive milling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6–2, pp. 476–479. (In Russ.).
11. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Machining optimization based on modal and dynamometric analysis. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in Industry], 2013, no. 1–2, pp. 42–46. (In Russ.).
12. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. New York: Cambridge University Press, 2012, 366 p.
13. Pyatykh A.S., Savilov A.V. The identification cutting force coefficients for simulation of the machining. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 17, no. 2, pp. 211–216. (In Russ.).
14. Pyatykh A.S., Savilov A.V. Determination of cutting force coefficients to simulate the drilling process. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technologies], 2016, no. 2 (30), pp. 69–73. (In Russ.) DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-69-73
15. Pyatykh A.S. Investigation of chucks for drilling precise holes. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technologies], 2016, no. 4 (32), pp. 70–74. (In Russ.) DOI: 10.18324/2077-5415-2016-4-70-74
16. *Regressionnyi analiz rezul'tatov odnofaktornogo eksperimenta* [Regression analysis of one-factor experiment results]. Available at: http://libraryno.ru/2-6-regressionnyy-analiz-rezultatov-odnofaktornogo-eksperimenta-osn_plan_exp/ (accessed 3 May 2019).
17. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Experiment planning when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 280 p. (In Russ.).



Критерии авторства

Николаев А.Ю. провел исследования, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nikolaev A.Yu. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Андрей Юрьевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: andrnikolajev@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Andrei Yu. Nikolaev,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: andrnikolajev@gmail.com



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-710-722>

Анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов

© В.Д. Сартаков

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследование свойств и параметров интерполяторов и анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов. Рассмотрен и применяется метод оценочной функции для синтеза интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов. Интерpolator предназначен для реализации траекторий движения рабочего органа станка или промышленных роботов, заданных в управляющей программе системы числового программного управления. При работе интерpolator использует входную информацию, которая поступает из управляющей программы системы числового программного управления. При решении задачи разработаны алгоритмы моделирования линейного и кругового интерполяторов системы числового программного управления станка или промышленных роботов по методу оценочной функции. На основе этих алгоритмов предложены варианты программ, которые реализуют математические модели интерполяторов на языке М-файлов Matlab. Приведены результаты моделирования линейных и круговых интерполяторов системы числового программного управления станка или промышленных роботов. Показана работоспособность разработанных моделей и алгоритмов работы интерполяторов системы числового программного управления станка или промышленных роботов. Также появилась возможность детального исследования показателей интерполятора и путей его совершенствования. Анализ результатов моделирования линейного и кругового интерполяторов позволяет сделать вывод о том, что математические модели интерполяторов корректно отражают его свойства.

Ключевые слова: система числового программного управления станка и промышленного робота, алгоритм, управляющая программа, интерpolator системы числового программного управления

Информация о статье: Дата поступления 20 марта 2019 г.; дата принятия к печати 09 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Сартаков В.Д. Анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления для металлорежущих станков и промышленных роботов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):710–722. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-710-722

Analysis of interpolator modeling methods for computer numerical control system of metal cutting machines and industrial robots

Valeriy D. Sartakov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to study interpolator properties and parameters and analyze modeling methods of interpolators for the numerical control system of metal cutting machines and industrial robots. The method of evaluation function is considered and applied for the synthesis of numerical control system interpolators for metal cutting machines and industrial robots. The interpolator is designed for the implementation of trajectories of a working body of a machine-tool or industrial robots set in the control program of the numerical control system. When in operation, the interpolator uses input information that comes from the control program of the numerical control system. Solution of the problem included the development of the simulation algorithms of linear and circular interpolators of the numerical control system of machine-tools or industrial robots by the method of evaluation function. The variants of programs implementing interpolator mathematical models in the language of Matlab M-files are proposed on the basis of these algorithms. The simulation results of linear and circular interpolators of numerical control system of a machine-tool or industrial robots are presented. The efficiency of the developed models and operation algorithms of numerical control system interpolators of a machine-tool or industrial robots is shown. The article outlines the possibility for the detailed study of indicators of the interpolator and ways to improve the latter. Analysis of the simulation results of linear and circular interpolators leads to the conclusion that mathematical models of interpolators correctly reflect their properties.

Keywords: numerical control system of a machine-tool and an industrial robot, algorithm, control program, numerical control system interpolator

Information about the article: Received March 20, 2019; accepted for publication July 09, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Sartakov V.D. Analysis of interpolator modeling methods for computer numerical control system of metal cutting machines and industrial robots. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):710–722. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-710-722

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы числового программного управления станками и промышленными роботами (ПР), как правило, построены с использованием средств микропроцессорной техники. При этом функции элементов современных систем числового программного управления (СЧПУ) реализуются программно. К таким элементам относится интерpolator (И) представляющий вычислительное устройство¹ [1, 2] и блок задания скорости. Интерpolator предназначен для реализации траекторий движения рабочего органа (РО) станка или ПР, заданных в управляющей программе СЧПУ [1, 3–5]. Интерpolator – это устройство, которое в каждый момент времени производит проверку и коррекцию соотношения скоростей рабочего органа по координатам в соответствии с траекторией движения рабочего органа, заданной в управляющей программе (УП) [1]. В каждый момент времени интерpolator обеспечивает согласование скоростей по каждой координате, что и является основой воспроизведения заданной траектории.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В каждый момент времени интерpolator обеспечивает согласование скоростей РО по каждой координате станка или ПР (резец, фреза, шлифовальный круг и схват ПР), что и является основой воспроизведения заданной траектории [1]. На

рис. 1 представлено изображение информационной модели интерполятора. Информационная модель интерполятора показывает, какие сигналы следует подать в каждом кадре УП на вход интерполятора для того, чтобы получить необходимую информацию на его выходе. Входная информация интерполятора – это информация, содержащая данные о величинах перемещений рабочего органа по координатам станка или ПР и значения начальных координат, определяемых по этим же осям, а также о скорости перемещения рабочего органа (линейная V или угловая скорость рабочего органа). Входная информация И содержит следующие данные: величину перемещений РО по координатам, допустим, X, Y, Z прямоугольной системы координат; значения начальных координат по этим же осям $X_{нач}, Y_{нач}, Z_{нач}$; скорость перемещения РО (линейная V или угловая скорость РО) [6–9].

Выходная информация интерполятора – это сигналы задания на системы электроприводов (ЭП) станка, допустим, по осям X, Y, Z , представляющие собой три унитарных последовательности импульсов по трем осям координат: задание на электропривод по оси X – ЭПх; задание на электропривод по оси Y – ЭПy; задание на электропривод по оси Z – ЭПz [10–12].

Исследование свойств и параметров интерполяторов, а также анализ методики моделирования интерполяторов системы числового программного управления являются актуальной задачей [13–17].

¹Иванов В.М. Электроприводы с системами числового программного управления: учеб. пособ. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. 152 с. / Ivanov V.M. Electric drives with numerical control systems: Learning aids. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University Publishing House, 2006.152 p.

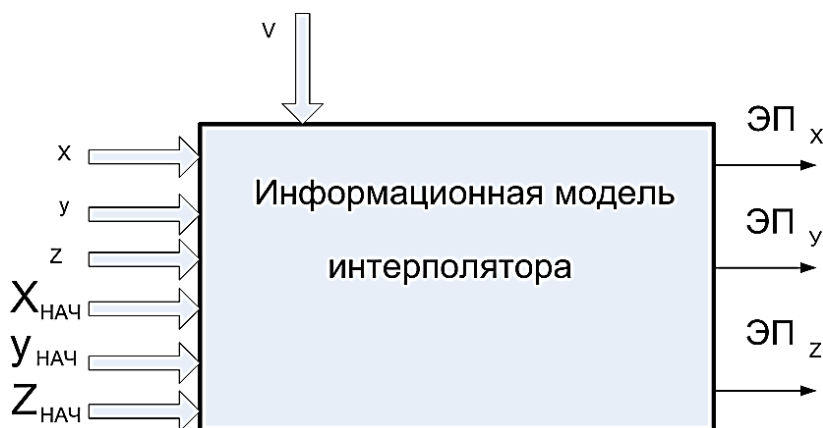


Рис. 1. Информационная модель интерполятора
Fig. 1. Information model of the interpolator

3. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интерполяторы можно разделить на несколько групп. Для этого используются следующие классификационные признаки: метод построения интерполяторов; математический метод, используемый для синтеза интерполяторов; тип линий (траекторий), реализуемых интерполяторами [1].

Среди математических методов, используемых в интерполяторах, различают следующие: метод цифровых дискретных анализаторов цифровых интеграторов (ЦИ) и метод оценочной функции [1, 13, 15, 16].

Классификация интерполяторов по типу линий, реализуемых интерполяторами, делит их на следующие группы: линейные интерполяторы и круговые интерполяторы. Виды траекторий, выполняемых интерполяторами промышленных СЧПУ – прямая линия и окружность (дуга окружности) [1, 10, 12, 18].

Функционирование интерполяторов основывается на использовании математической модели интерполяторов (ММИ) [1, 18–23]. Выбор ММИ зависит от следующих критериев: вида заданной траектории РО станка, квадранта, в котором эта траектория представлена, и метода, который положен в основу реализации интерполятора [1, 18]. Структуры математических моделей интерполяторов в разных квадрантах похожи, но не совпадают [1]. При использовании метода цифровых дискретных анализато-

ров (цифровых интеграторов) различают две традиционных формы представления математических моделей интерполяторов: форма уравнений состояния и форма структурной схемы [1, 16].

В данной работе применяется метод оценочной функции, при котором синтез интерполятора осуществляется по моделям, использующих рекуррентные соотношения [1]. Оценочная функция (ОФ) – это особым образом сформированная функция, знак которой определяет координату (X или Y), для которой интерполятор в текущий момент времени выдает команду (импульс) на перемещение. Например, если знак оценочной функции положительный, то импульс, соответствующий перемещению на 1 шаг, выдается по оси X, а если отрицательный, то по оси Y.

В статье [1] приведено выражение для оценочной функции, полученной для линейного интерполятора (ЛИ) при реализации траектории в виде прямой линии в первом квадранте системы координат.

$$F_{ij} = (x_k \cdot y_j - x_i \cdot y_k), \quad (1)$$

где i и j – число шагов по оси X и Y; x_i – проекция «реального» отрезка прямой на ось X, y_j – проекция отрезка этой прямой на ось Y; x_k и y_k – проекции «заданного» отрезка прямой на оси X и Y (координаты конечной точки отрезка OA при нулевых координатах начальной точки).

Для синтеза структуры ЛИ по рассматриваемому методу используются рекуррентные выражения для оценочной функции при увеличении числа шагов на единицу по оси X (т.е. $i + 1$) и по оси Y (т.е. $j + 1$) в первом квадранте:

$$F_{(i+1)j} = F_{ij} - y_j; \quad (2)$$

$$F_{i(j+1)} = F_{ij} + x_i \quad (3)$$

при дополнении уравнений (2) и (3) следующими условиями:

1) если $F_{ij} \leq 0$, то подается команда на перемещение привода по оси X;

2) если $F_{ij} \leq 0$, то подается команда на перемещение привода по оси Y.

Получаем математическую модель линейного интерполятора, работающего по методу оценочной функции (МОФ) для первого квадранта.

Для других квадрантов декартовой системы координат математическая модель линейного интерполятора, работающего по методу МОФ, составляется аналогично, но будет отличаться знаками и значениями членов выражений (2) и (3). Станут модифицироваться также условия для подачи команд на приводы СЧПУ.

Математическая модель кругового интерполятора (КИ) по методу оценочной функции разрабатывается по аналогичной методике. Оценочная функция для кругового интерполятора выглядит следующим образом:

$$F_{ij} = (x_i)^2 + (y_j)^2 - R^2, \quad (4)$$

где x_i и y_j – текущие координаты движущейся по окружности точки РО; R – радиус окружности.

Для синтеза структуры КИ по методу оценочной функции необходимо проанализировать его работу при увеличении числа шагов на единицу по оси X (т.е. $i+1$) и по оси Y (т.е. $j+1$). Учтем, что при реализации траектории в виде дуги окружности в первом квадранте

$$x_{i+1} = x_i + 1, \quad (5)$$

$$y_{j+1} = y_j - 1. \quad (6)$$

Тогда рекуррентные выражения для ОФ для кругового интерполятора в первом квадранте при увеличении числа шагов на единицу по оси X (т.е. $i+1$) и по оси Y (т.е. $j+1$) выглядят следующим образом.

$$F_{(i+1)j} = F_{ij} + 2 \cdot x_i + 1. \quad (7)$$

$$F_{i(j+1)} = F_{ij} - 2 \cdot y_j + 1. \quad (8)$$

Для других квадрантов системы координат математическая модель КИ, работающего по методу МОФ, составляется аналогично, но будет отличаться знаками и значениями членов выражений (7) и (8). Будут модифицироваться также условия для подачи команд на приводы СЧПУ.

На рис. 2. представлен алгоритм программной реализации линейного интерполятора по методу ОФ, в котором использованы элементы команд пятого поколения СЧПУ (ПП – программный продукт).

На рис. 3. представлен алгоритм программной реализации КИ по методу ОФ при движении РО по часовой стрелке.

В представленной блок-схеме алгоритма программной реализации КИ по методу ОФ можно выделить следующие части:

- определение типа интерполятора и направления движения рабочего органа;
- определения номера квадранта;
- программная реализация математической модели кругового интерполятора при движении рабочего органа в первом квадранте по часовой стрелке.

Определение типа интерполятора осуществляется с помощью двух условных блоков (1 и 2). При этом производится сравнение подготовительной команды УП с кодом команды, при которой реализуется КИ при движении рабочего органа по часовой стрелке. Блоки 3 и 4 алгоритма «отвечают» за определение номера квадранта, в

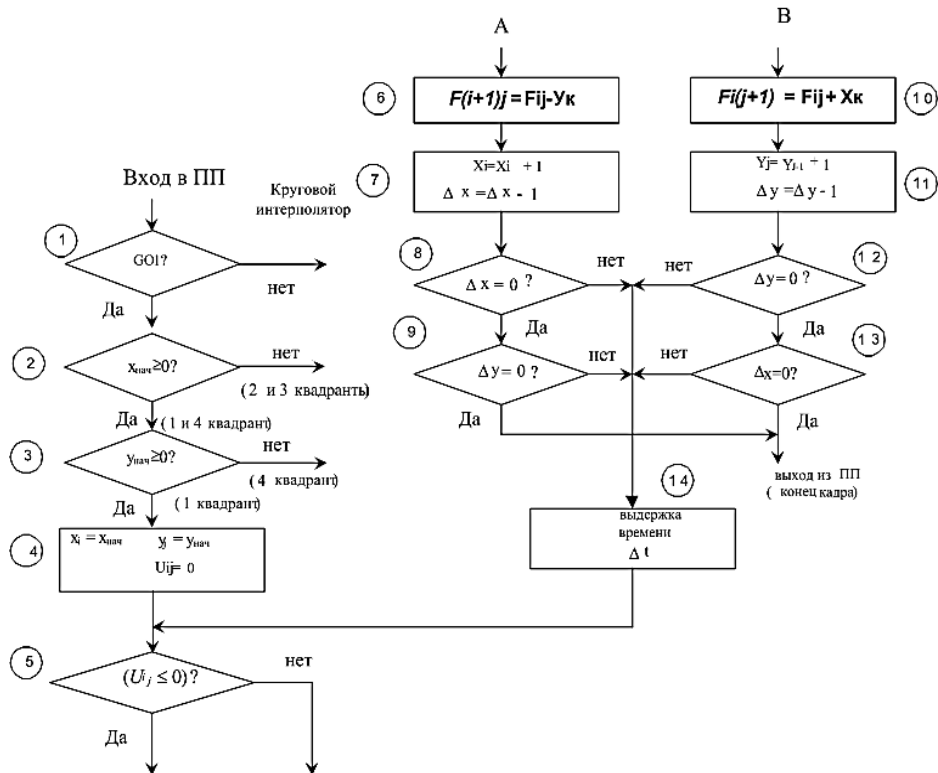


Рис. 2. Алгоритм программной реализации линейного интерполятора по методу оценочной функции
Fig. 2. Algorithm of linear interpolator software implementation by the method of evaluation function

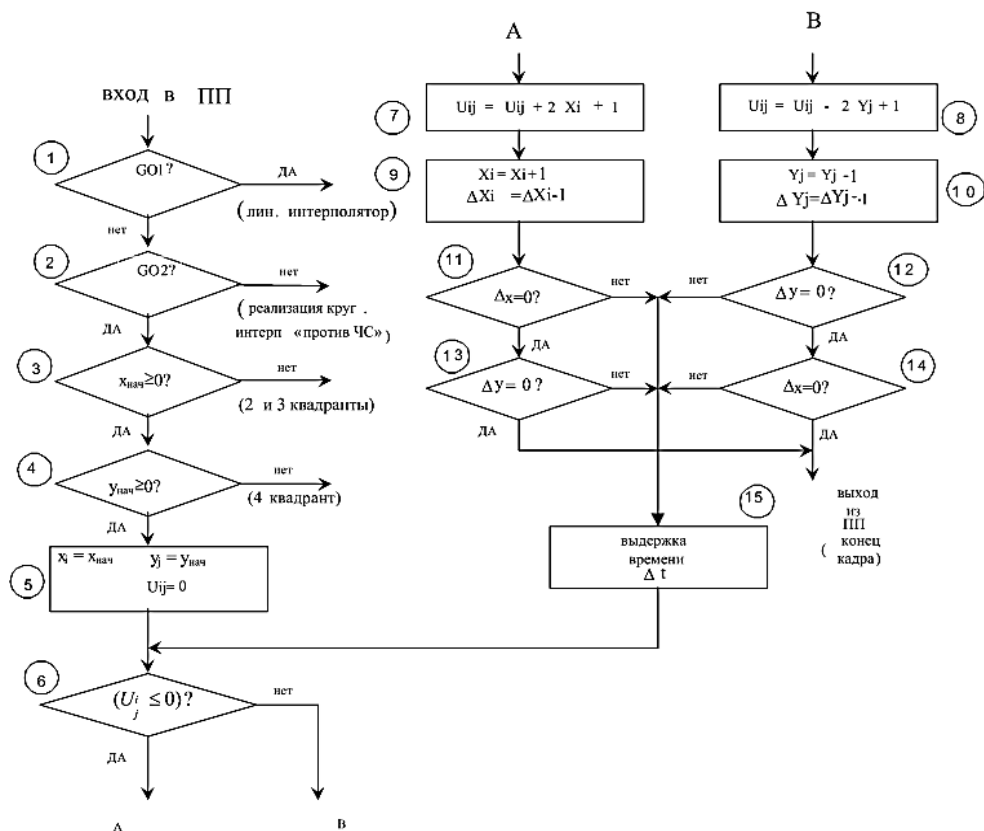


Рис. 3. Алгоритм программной реализации кругового интерполятора по методу оценочной функции
Fig. 3. Algorithm of circular interpolator software implementation by the method of evaluation function

котором будет двигаться рабочий орган. В 5 блоке текущим значениям координат X_i и Y_j присваиваются начальные значения этих же координат, а текущее значение оценочной функции F_{ij} приравнивается нулю.

В условном блоке 6 проверяется существование неравенства $F_{ij} < 0$. Если неравенство выполняется, то алгоритм «ветвится» на электропривод по оси X. Если F_{ij} положительная, то работа алгоритма направляется по ветви электропривода по оси Y. Блоки 7–10 непосредственно реализуют математическую модель КИ при движении рабочего органа в первом квадранте по часовой стрелке. В блоках 11–14 проверяется окончание отработки кадра. Блок 15 осуществляет временную задержку, имитирующую работу блока задания скорости.

Аналогичным образом можно провести анализ алгоритма программной реализации линейного интерполятора по методу ОФ (см. рис. 2).

Рассмотрим методику моделирования интерполяторов системы числового программного управления в ядре Matlab на языке М-файлов. Для ввода исходных данных из управляющей программы СЧПУ в программе «Интерполятор» используется следующий фрагмент, поясняющий подготовку к реализации интерполятора в первом квадранте.

1% Программа для реализации интерполятора в первом квадранте по часовой стрелке.

2 G01 = 1; % Для подготовительной функции «G01» установлен числовой код, равный «1».

3 G02 = 2; % Для подготовительной функции «G02» установлен числовой код, равный «2».

4 G02 = 3; % Для подготовительной функции «G03» установлен числовой код, равный «3».

5 g = G02; % Для подготовительной функции, которая определяет тип кругового 6%-го интерполятора по часовой стрелке, в данной программе принята переменная «g».

7 x1nach = 90; % Начальное значение «x1nach» по координате «X» принято

равным «90».

8 y1nach = 100; % Начальное значение «y1nach» по координате «Y» принято равным «100».

9 x1kon = 101; % Конечное значение «x1kon» по координате «X» принято равным «101».

10 y1kon = 70; % Конечное значение «y1kon» по координате «Y» принято равным «70».

11 deltax = x1kon-x1nach; % Приращение «deltax» по координате «X» принято равным

12% «x1kon-x1nach».

13 deltax = y1kon-y1nach; % Приращение «deltay» по координате «Y» принято равным

14% «y1kon-y1nach».

Далее представлен фрагмент программы, поясняющий выполнение блоков 1 и 2 алгоритма реализации КИ по часовой стрелке в первом квадранте по методу ОФ (см. рис. 3).

15 if g==G01

16% Если «g==G01», то выбирается реализация линейного интерполятора «G01»

17 if g==G02

18% Если «g==G02», то выбирается реализация кругового интерполятора по часовой

19 % стрелке «G02»

20 if g==G03

21 % Если «g==G03», то выбирается реализация кругового интерполятора против часовой

22% стрелки «G03»

.....

nm end

n(m+1) end

n(m+2) end

После определения типа интерполятора в алгоритме необходимо установить квадрант его реализации. Далее приводится фрагмент программы, поясняющий выполнение блоков 3 и 4 алгоритма реализации КИ по часовой стрелке в первом квадранте по методу ОФ (см. рис. 3).

23 if x1nach>=0

24% Если начальное значение



«x1nach» больше или равно нулю («x1nach» $\geq$ 0),

25% то для реализации кругового интерполятора по часовой стрелке выбирается

26% правая полуплоскость «х-у»

27 if y1nach $\geq$ 0

28% Если начальное значение «y1nach» больше или равно нулю («y1nach» $\geq$ 0),

29% то для реализации кругового интерполятора по часовой стрелке выбирается

30% первый квадрант плоскости «х-у»

После этих действий в алгоритме производится задание начальных значений координат по осям X и Y. Фрагмент программы, поясняющий выполнение блока 5 алгоритма реализации КИ по часовой стрелке в первом квадранте по методу ОФ (см. рис. 3), представлен в следующем виде.

31 xi=x1nach; % Текущее значение «xi» по координате «X» в первом квадранте

32% приравнивается начальному значению «x1nach», т.е. «xi=x1nach»

33 yj=y1nach; % Текущее значение «yj» по координате «Y» в первом квадранте

34% приравнивается начальному значению «y1nach», т.е. «yj=y1nach»

35 Fij=0; % «Fij» – начальное значение оценочной функции приравнивается нулю

36 xii = [x1nach]; % Создание матрицы результатов вычислений координаты X для вывода на

37% график

38 yjj = [y1nach]; % Создание матрицы результатов вычислений координаты Y для вывода на 39 % график

40 while xi<x1kon || yj>y1kon % Начало оператора цикла

Оператор в строке 40 управляющей программы реализует начало выполнения группы блоков 11–14 алгоритма (см. рис. 3), в котором выполняется цикл при синтезе кругового интерполятора в первом квадранте по часовой стрелке. На следующем фрагменте программы приведена реализация блока 6 алгоритма.

41 if Fij $\leq$ 0

42% На этом шаге реализуется движение по «X» в первом квадранте по часовой стрелке

43% Выдать по координате «X» сигнал логической «1»

На следующем фрагменте программы поясняется выполнение блоков 7 и 9.

44 Fij=Fij+2*xi+1; % Новое значение оценочной функции после шага по оси «X»

45 xi=xi+1 % новое значение текущей координаты «X» после 1 шага по оси X

46 deltax=deltax-1; % сколько осталось сделать шагов по оси «X»

47% Выдается на систему электропривода по оси «X» сигнал, который

48% вызывает перемещение механизма по оси «X» на расстояние,

49% соответствующее одной дискрете (допустим, 0,010 мм)

Так как производится изменение значения координаты по оси X, то в строках 50–53 программы осуществляется коррекция матриц «X» и «Y» для правильного представления результатов вычислений координаты X при выводе графика Y=f(X) на графопостроитель Matlab.

50 xii = [xii, xi]; % Коррекция матрицы результатов вычислений координаты X для вывода на 51 % график

52 yjj = [yjj, yj]; % Коррекция матрицы результатов вычислений координаты Y для вывода на 53% график

В следующем фрагменте программы поясняется выполнение блоков 8 и 10.

54 elseif Fij>0

55% На этом шаге реализуется движение по «Y» в первом квадранте

56% Выдать по координате «Y» сигнал логической «1»

57 Fij=Fij-2*yj+1; % Новое значение оценочной функции после шага по «у»

58 yj=yj-1 % Новое значение текущей координаты «Y» после 1 шага по Y

59 deltax=deltax+1; % сколько осталось сделать шагов по «у»

60% Выдается на систему электропривода по оси «Y» сигнал, который

61% вызывает перемещение механизма по оси «Y» на расстояние,

62% соответствующее одной дискрете

В «теле» оператора цикла «while» находится блок 15, с помощью которого выполняется задержка на интервал времени Δt (пауза), зависящий от величины скорости движения РО станка или промышленного робота, заданных в управляющей программе СЧПУ. Сначала в этом блоке устанавливаются величина, интервал времени Δt , а затем производится запуск оператора «пауза». Чем больше величина скорости движения РО станка или ПР, заданных в управляющей программе СЧПУ, тем меньше интервал времени Δt . В следующем фрагменте программы приведены операторы завершения УП.

63 pause(0.1) % Указание выбора интервала паузы в секундах

64 pause on % Запуск оператора «пауза»

65 end % Завершение оператора цикла «while»

В следующем фрагменте программы приведены операторы завершения управляющей программы.

66 end

67 end

68 end

69 end

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4. представлен результат моделирования работы программного кругового интерполятора (фрезерного станка) по часовой стрелке в первом квадранте при следующих исходных данных дуги окружности: $x1nach=90$; $y1nach=100$; $x1kon=101$; $y1kon=70$. Величина одного шага (дискреты) равна $\Delta L1$. Время моделирования при интервале паузы $\Delta t=0.1$ с равно 6 с. На рис. 5 приведен результат моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке в первом квадранте при следующих исходных данных: $x1nach=900$; $y1nach=1000$; $x1kon=1010$; $y1kon=700$. Радиус дуги окружности для этого случая больше примерно в 10 раз, а величина одной дискреты $\Delta L2$ меньше в 10 раз: ($\Delta L2 = \frac{\Delta L}{10}$). Время моделирования при интервале паузы $\Delta t=0.1$ с – равно 60 с.

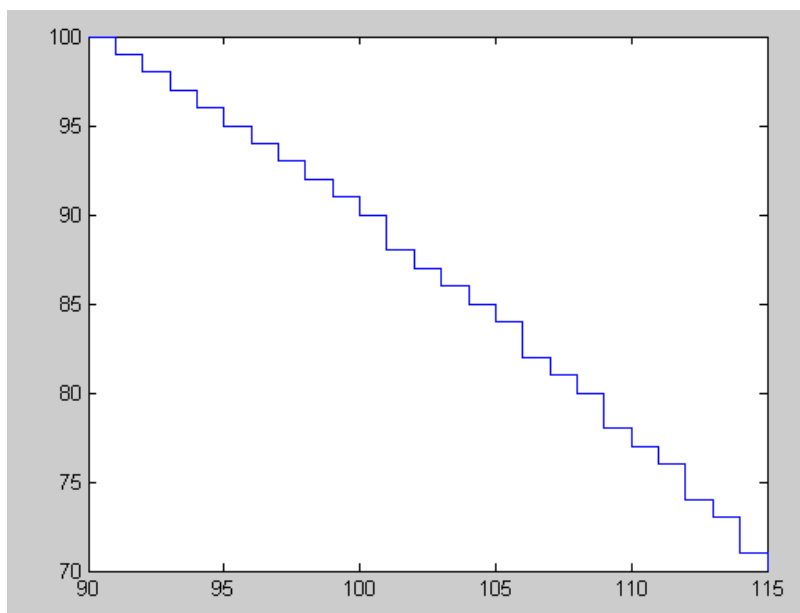


Рис. 4. Результат моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке в первом квадранте для исходных данных: $x1nach = 90$; $y1nach = 100$; $x1kon = 101$; $y1kon = 70$
Fig. 4. Simulation result of software circular interpolator clockwise operation in the first quadrant for the input data: $x1nach = 90$; $y1nach = 100$; $x1kon = 101$; $y1kon = 70$

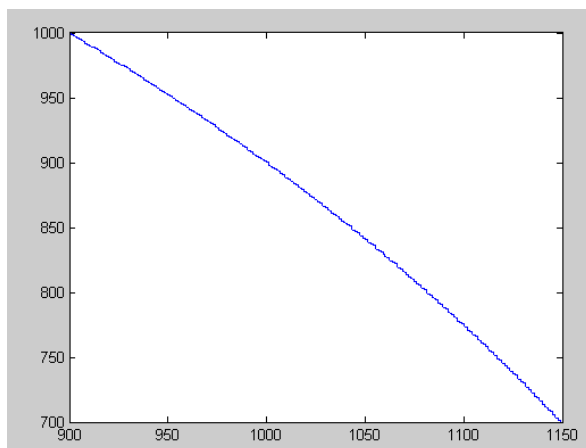


Рис. 5. Результат моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке в первом квадранте для исходных данных: $x1nach = 900$; $y1nach = 1000$; $x1kon = 1010$; $y1kon = 700$

Fig. 5. Simulation result of software circular interpolator clockwise operation in the first quadrant for the input data: $x1nach = 900$; $y1nach = 1000$; $x1kon = 1010$; $y1kon = 700$

Результат моделирования по часовой стрелке для четверти окружности, расположенной в первом квадранте, приведен на рис. 6. Величина одного шага (дискреты) равна $\Delta L2$.

На рис. 7 представлены результаты моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке, соответственно, во втором, третьем и четвертом квадрантах для четверти окружности. Величина одной дискреты $\Delta L3$ примерно равна $\Delta L3 = 2 \cdot L2$.

В процессе выполнения работы были исследованы модели программного кругового интерполятора по часовой стрелке в

четырёх квадрантах.

Анализ результатов моделирования программного кругового интерполятора по часовой стрелке показал работоспособности разработанной модели и алгоритма работы. Также появилась возможность детального исследования показателей интерполятора и путей его совершенствования.

На рис. 8 приведены результаты моделирования работы программного линейного интерполятора в первом, во втором, третьем и четвертом квадрантах. Величина одного шага примерно равна $\Delta L4 = 20 \cdot \Delta L2$.

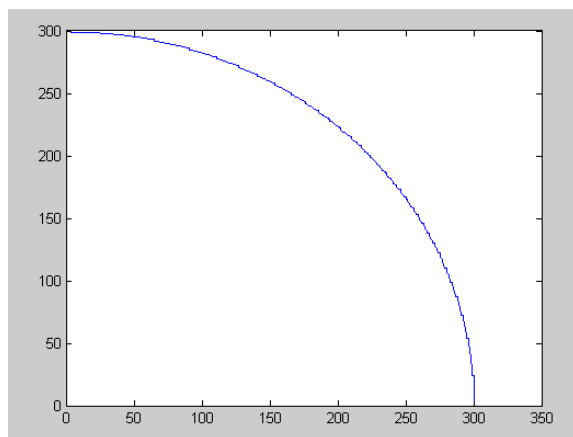


Рис. 6. Результат моделирования работы программного кругового интерполятора (фрезерного станка) по часовой стрелке в первом квадранте для четверти окружности
Fig. 6. Simulation result of software circular interpolator clockwise operation (milling machine) in the first quadrant for the quarter of the circle

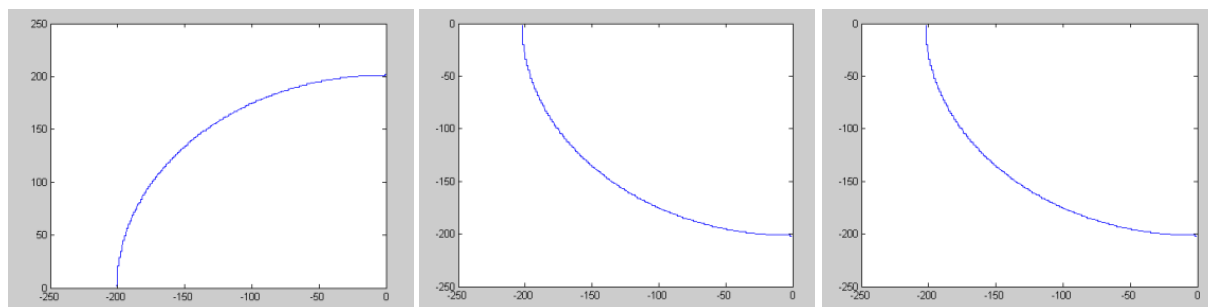


Рис. 7. Результат моделирования работы программного кругового интерполятора по часовой стрелке во втором, третьем и четвертом квадрантах для четверти окружности
Fig. 7. Simulation result of software circular interpolator clockwise operation in the second, third and fourth quadrants for the quarter of the circle

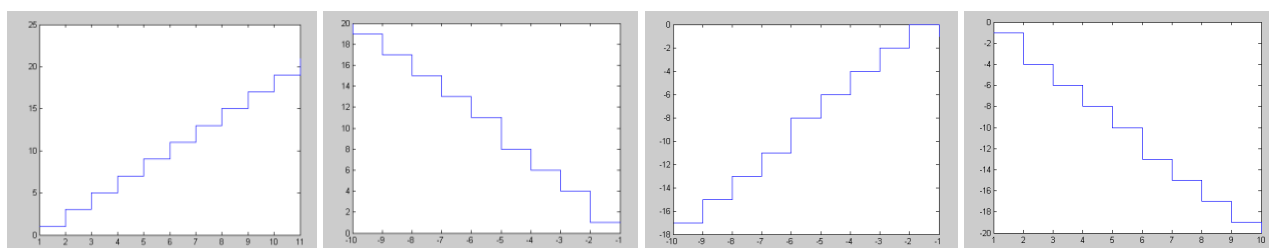


Рис. 8. Результат моделирования работы программного линейного интерполятора в первом, втором, третьем и четвертом квадрантах
Fig. 8. Simulation result of software linear interpolator operation in the first, second, third and fourth quadrants

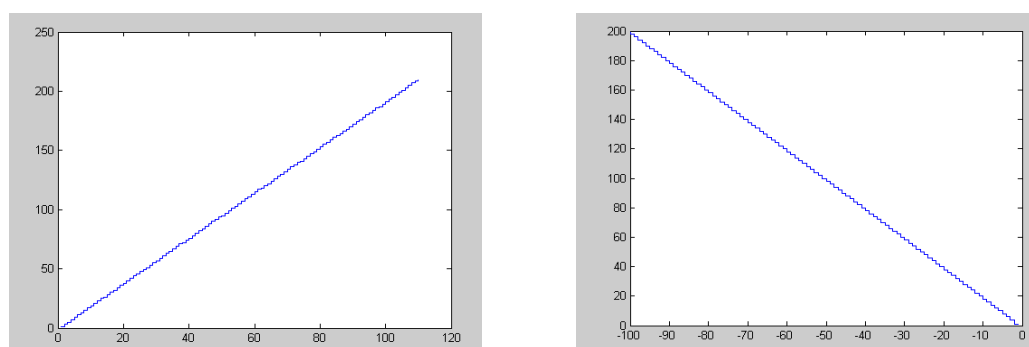


Рис. 9. Результат моделирования работы программного линейного интерполятора

в первом и во втором квадрантах при $\Delta L5 = \frac{\Delta L4}{10}$

Fig. 9. Simulation result of software linear interpolator operation

in the first and second quadrants at $\Delta L5 = \frac{\Delta L4}{10}$

Анализ результатов моделирования линейного интерполятора позволяет сделать вывод о том, что математические модели интерполятора корректно отражают его свойства. Проведенные исследования дают возможность определить пути программного изменения величины интервала паузы Δt . При уменьшении шага, соответствующего одной дискрете задания, в 10

раз ($\Delta L5 = \frac{\Delta L4}{10}$) изменяется вид траектории движения РО (рис. 9).

5. ВЫВОДЫ

Анализ результатов моделирования программного кругового интерполятора (фрезерного станка) по часовой стрелке



показал работоспособность разработанной модели и алгоритма работы. Также появилась возможность детального исследования показателей интерполятора и путей его совершенствования.

Анализ результатов моделирования линейного интерполятора (фрезерного станка) позволяет сделать вывод о том, что математические модели интерполятора

корректно отражают его свойства. Проведенные исследования дают возможность определить пути программного изменения величины интервала паузы Δt . При уменьшении шага, соответствующего одной дискрете задания, в 10 раз изменяется вид траектории движения РО.

Результаты работы можно также применить для образовательных целей.

Библиографический список

1. Сусоев Е.О., Сартаков В.Д. Анализ структуры интерполятора системы числового программного управления // Повышение эффективности производства и использования электрической энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием: в 2 т. (г. Иркутск, 24–28 апреля 2017 г.). Иркутск, 2017. С. 71–75.
2. Başer O., Çetin L., Uyar E. Trajectory control of a bipedal robot using feed forward compensation methodology // International journal of mechatronics and manufacturing systems. 2011. Vol. 4. No. 2. P. 185–198.
3. Юмаев Р.А. История развития оборудования с числовым программным управлением и их использование в образовательном процессе // Отечественное образование: современное состояние и перспективы развития: сб. статей VII Всерос. Шаховских педагогических чтений научной школы Управления образовательными системами (г. Москва, 23 января 2015 г.). Москва, 2015. С. 545–547.
4. Красильникянц Е.В., Бурков, А.П., Иванков В.А., Булдукян Г.А., Ельниковский Е.В., Варков А.А. Системы управления движением технологических объектов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. Вып. 4. 2007. С. 42–46.
5. Обухов А.И., Любимов А.Б., Григорьев Н.С. Структура и особенности реализации интерполятора траектории в системе ЧПУ "АКСИОМА КОНТРОЛ" // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта: сб. тр. XVI Междунар. молодежной конф. (г. Москва, 15 сентября 2016 г.). Москва, 2016. С. 173–174.
6. Зеленский А. А., Подураев Ю. В., Бондарь Д. В. Способ повышения точности интерполяции сложного контура для мехатронных модулей и промышленных роботов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 9. С. 44–48.
7. Шахнин В.А. Адаптивный интерполятор для гибких мехатронных модулей неразрушающего контроля // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 3. С. 11–14.
8. Пат. № 2667658, Российская Федерация, G05B19/4103, A47L 15/46. Многокоординатный цифровой интерполятор / И.Н Булатникова, Н.Н. Гершунина; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный технологический университет; опубл. 03.10.2017.
9. Гречишников В.М., Теряева О.В. Трехфазный интерполятор канала точного отсчета цифровых преобразователей перемещений // Труды международного симпозиума. Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 157–160.
10. Чикуров Н.Г., Мавлютов М.С. Высокоскоростной сплайновый интерполятор повышенной точности для компьютерных устройств ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 51–55.
11. Зеленский А.А., Бондарь Д.В., Валюкевич В.А. Способ формирования траектории перемещения рабочего инструмента для цифровых систем управления промышленными роботами // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 9. С. 77–80.
12. Зеленский А.А., Подураев Ю.В., Бондарь Д.В. Подход к исследованию неравномерно распределенного множества интерполяционных узлов для неортогональных мехатронных модулей контурной обработки материалов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 11. С. 33–35.
13. Рентюк В.А. Линейный интерполятор на устройствах выборки/ хранения с потерями: модель и практическая реализация // Компоненты и технологии. 2014. № 6 (155). С. 116–121.
14. Гаврилов С.В., До Тхань Занг. Компьютерное моделирование динамики движения пятистепенного шагающего робота // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2016. Т. 1. С. 72–76.
15. Антоненко А.В. Модель обучаемой структуры интерполятора на основе радиально-базисной сети // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Тамбов, 15–17 ноября 2017 г.). Тамбов, 2017. С. 384–388.
16. Валюкевич Ю.А., Наумов И.И. Кинематическая модель двухзвенного механизма на основе цифровых дифференциальных анализаторов и планирование траектории в прямоугольной системе координат // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. Т. 7. № 3. С. 3–9.
17. Горлин О.А., Дугин Ю.А., Подоров С.В., Скрипкин Д.В., Наумов И.И. Синтез алгоритма интерполяции отрезка прямой для планирования траектории движения вырожденного двухзвенного механизма // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-2 (23). С. 69.
18. Мусиенко М.П., Крайнык Я.М., Денисов А.О., Бугаев В.И. К вопросу построения геометрических примитивов в интерполяторе 3D-принтера с управ-

лением на основе FPGA // *Universum: технические науки*. 2014. № 4 (5). С. 3–10.

19. Фокин В.Г., Шаныгин С.В. Структура системы управления шестиногого шагающего робота Гексабот [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 5. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN516.pdf> (дата обращения: 10.11.2017).

20. Ермаков Р.В., Кондратов Д.В., Львов А.А., Афанасьев М.Ю. Оценка параметров интерполятора бесконтактного оптического датчика угла // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ*. 2015. № 6 (76). С. 83–86.

21. Петров С.С. Некоторые методы борьбы с немерным остатком при интерполяции в системе числового программного управления // *Современ-*

ные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2013): сб. тр. VI Междунар. конф. (г. Пермь, 25 октября 2013 г.). Пермь, 2013. С. 188–190.

22. Подачников А.В. Интерполятор траекторного перемещения диагностического датчика // *ЭНЕРГИЯ-2018: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых* (г. Иваново, 3–5 апреля 2018 г.). Иваново, 2018. С. 11–15.

23. Гречишников В.М., Теряева О.В. Перемещения с трехфазным интерполятором в канале точного отсчета // *Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2016: труды XIII Междунар. науч.-техн. конф.: в 12 т.* (г. Новосибирск, 3–6 октября 2016 г.). Новосибирск, 2016. С. 107–109.

References

1. Susoev E.O., Sartakov V.D. *Analiz struktury interpolatora sistemy chislovogo programmnoy upravleniya* [Interpolator structure analysis of the numerical control system]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya elektricheskoy energii v usloviyakh Sibiri"* [Proceedings of All-Russian scientific and practical conference with international participation "Improving efficiency of electric energy production and use in Siberia", Irkutsk, 24–28 April 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 71–75. (In Russ.).

2. Başer O., Çetin L., Uyar E. Trajectory control of a bipedal robot using feed forward compensation methodology // *International journal of mechatronics and manufacturing systems*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 185–198.

3. Yumaev R.A. *Istoriya razvitiya oborudovaniya s chislovyim programmnyim upravleniem i ih ispol'zovanie v obrazovatel'nom processe* [Development history of CNC equipment and its use in educational process]. *Sbornik statej VII Vserossiyskikh Shahovskih pedagogicheskikh chtenij nauchnoj shkoly Upravleniya obrazovatel'nymi sistemami "Otechestvennoe obrazovanie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya"* [Collected works of VII All-Russian Shanovsky pedagogical readings of the scientific school of Educational System Management "Domestic education: current status and development prospects", Moscow, 23 January 2015]. Moscow, 2015, pp. 545–547. (In Russ.).

4. Krasil'nik'yanc E.V., Burkov, A.P., Ivankov V.A., Buldukyan G.A., El'nikovskij E.V., Varkov A.A. Technological objects traffic control systems. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2007, Issue. 4, pp. 42–46. (In Russ.).

5. Obukhov A.I., Lyubimov A.B., Grigoriev N.S. *Struktura i osobennosti realizacii interpolatora traektorii v sisteme ChPU "AKSIOMA KONTROL"* [Structure and implementation features of the interpolator trajectory in the CNC system "AXIOMA CONTROL"]. *Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoj molodezhnoj konferencii "Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo cikla promyshlennogo produkta"* [Collected works of XVI In-

ternational Youth Conference "Systems for design, technological preparation of production and management of industrial product life cycle stages", Moscow, September 15th 2016]. Moscow, 2016, pp. 173–174. (In Russ.).

6. Zelensky A.A., Poduraev Yu.V., Bondar D.V. A method to improve interpolation accuracy of a complex contour for mechatronic modules and industrial robots. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2011, no. 9, pp. 44–48. (In Russ.).

7. Shakhnin V.A. Adaptive interpolator for flexible mechatronic modules of nondestructive testing. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and Modern Technology], 2009, no. 3, pp. 11–14. (In Russ.).

8. Bulatnikova I.N., Gershunina N.N. *Mnogokoordinatnyj cifrovoy interpolator* [Multi-coordinate digital interpolator]. Patent RF, no. 2667658, 2017.

9. Grechishnikov V.M., Teryaeva O.V. Three phase interpolator of the channel of accurate reading of digital movement converters. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma. Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium. Reliability and quality.], 2016, vol. 2, pp. 157–160. (In Russ.).

10. Chikurov N.G., Mavlyutov M.S. High-speed spline interpolator for high precision CNC devices. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, no. 12, pp. 51–55. (In Russ.).

11. Zelensky A.A., Bondar D.V., Valyukevich V.A. Interpolation method for digital control systems of industrial robots. *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki* [Achievements of Modern Radio Electronics], 2011, no. 9, pp. 77–80. (In Russ.).

12. Zelensky A.A., Poduraev Yu. V., Bondar D.V. The method for determining non-uniformly distributed set of interpolation nodes for nonorthogonal mechatronic modules contouring materials. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, no. 11, pp. 33–35. (In Russ.).

13. Rentiuk V.A. Linear interpolator on sample and hold unit with losses: model and practical implementation.



Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies], 2014, no. 6 (155), pp. 116–121. (In Russ.).

14. Gavrilov SV, Do Thanh Zang. Computer simulation of movement dynamics of a five-degree walking robot. *Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike* [Automation in Electric Power Industry and Electrical Engineering], 2016, vol. 1, pp. 72–76. (In Russ.).

15. Antonenko A.V. *Model' obuchaemoj struktury interpolatora na osnove radial'no-bazisnoj seti* [Model of an interpolator learning structure based on a radial basis network]. *Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyj dizajn"* [Proceedings of IV International scientific and practical conference "Virtual Modeling, Prototyping and Industrial Design", Tambov, 15–17 November 2017]. Tambov, 2017, pp. 384–388. (In Russ.).

16. Valyukevich Yu.A., Naumov I.I. Kinematic model of a two-link mechanism based on digital differential analyzers and trajectory planning in a rectangular coordinate system. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2011, vol. 7, no. 3, pp. 3–9. (In Russ.).

17. Gorlin O.A., Dugin Yu.A., Podorov S.V., Skripkin D.V., Naumov I.I. Synthesis of the interpolation algorithm of a straight line segment for planning degenerate two-link mechanism trajectory. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2012, no. 4–2 (23), p. 69. (In Russ.).

18. Musienko M.P., Kraynyk Y.M., Denisov A.O., Bugaev V.I. On geometric primitives construction in interpolator of 3D-printer with control based on FPGA. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Engineering Sciences], 2014, no. 4 (5), p. 3.

19. Fokin V.G., Shanygin S.V. The structure of the control system of a six-legged walking robot Hexabot. Online journal "SCIENCE". 2016, vol. 8, no. 5. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN516.pdf> (accessed 10 November 2017).

20. Ermakov R.V., Kondratov D.V., Lvov A.A., Afanasyev M.Yu. Parameter estimation of an interpolator of a contactless optical angle sensor. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah – MMTT* [Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMET], 2015, no. 6 (76), pp. 83–86. (In Russ.).

21. Petrov S.S. *Nekotorye metody bor'by s nemernym ostatkom pri interpolatsii v sisteme chislovogo programnogo upravleniya* [Some methods of dealing with the unmeasured remainder at interpolation in the numerical program control system]. *Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoj konferencii "Sovremennye metody prikladnoj matematiki, teorii upravleniya i komp'yuternykh tekhnologii (PMTUKT-2013)"* [Proceedings of VI International Conference "Modern methods of applied mathematics, control theory and computer technology (AMCTCT-2013)", Perm, 25–26 October 2013]. Perm, 2013, pp. 188–190.

22. Podachnikov A.V. *Interpolyator traektorного перемещения диагностического датчика* [Interpolator of the diagnostic sensor trajectory]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "ENERGIYa-2018"* [Proceedings of XIII International scientific and technical Conference of students, postgraduates and young scientists "Energy-2018", Ivanovo, 3–5 April 2018]. Ivanovo, 2018, pp. 11–15.

23. Grechishnikov V.M., Teryaeva O.V. *Peremeshcheniya s trekhfaznym interpolatorom v kanale tochnogo otscheta* [Movements with a three-phase interpolator in the exact reference channel]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya APEP – 2016"* [Proceedings of XIII International scientific and technical Conference "Actual problems of electronic instrument making APEIM - 2016", Novosibirsk, 3–6 October 2016]. Novosibirsk, 2016, pp. 107–109. (In Russ.).

Критерии авторства

Сартаков В.Д. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Сартаков Валерий Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры электропривода
и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: valery_41@mail.ru

Authorship criteria

Sartakov V. D. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valeriy D. Sartakov,
Cand. Sci.(Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Electric Drive
and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: valery_41@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.7.092

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-723-730>

Определение оптимального сочетания параметров управления промышленным роботом в робототехническом комплексе обработки кромок деталей

© А.В. Сидорова, Б.Б. Пономарев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация: Цель – определить оптимальные параметры управления процессом удаления острых кромок и формообразования фасок установленного размера с помощью промышленного робота на деталях после их механической обработки на многоцелевых станках с числовым программным управлением. В статье рассматривается метод назначения управляемых параметров (подача, частота вращения шпинделя, коэффициент усиления и сила резания) по комплексному критерию оптимизации, точности обработки и параметру качества микрорельефа поверхностного слоя. В качестве отслеживаемых критериев выбраны размер фаски и шероховатость поверхности R_a . Представлен алгоритм выбора параметров управления процессом финишной обработки деталей. Разработаны методика поиска оптимального решения и программное обеспечение системы оптимизации процесса финишной обработки деталей в условиях робототехнического комплекса, позволяющие определить оптимальные настроечные параметры обработки кромок деталей: подачу, частоту вращения шпинделя, коэффициент усиления и силу резания, которые обеспечивают при финишном формообразовании выполнение требований конструкторско-технологической документации. Полученные результаты имеют практическое применение и способствуют сокращению объема ручных доводочных работ.

Ключевые слова: финишная обработка, размер фаски, шероховатость поверхности, оптимизация, робототехнический комплекс, зачистка кромок, автоматизация

Информация о статье: Дата поступления 05 июня 2019 г.; дата принятия к печати 15 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Сидорова А.В., Пономарев Б.Б. Определение оптимального сочетания параметров управления промышленным роботом в робототехническом комплексе обработки кромок деталей. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):723–730. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-723-730

Determination of optimal combination of industrial robot control parameters in a part edge processing robotic complex

Alena V. Sidorova, Boris B. Ponomarev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to determine the optimal control parameters of the process of removing sharp edges and shaping chamfers of the set size by means of an industrial robot on the parts after their machining on multi-purpose machine-tools with numerical control. The article discusses a method of setting controllable parameters (feed, spindle rotation frequency, gain factor and cutting force) by the complex optimization criterion, machining accuracy and quality parameter of the surface layer microrelief. The chamfer size and surface roughness R_a are chosen as the monitored parameters. The algorithm for choosing the control parameters of finishing processing of parts is presented. The authors have developed a technique to search for optimal solutions and software for the optimization system of part finishing treatment in a robotic system that allow to determine the optimal tuning parameters of edge processing: feed, spindle rotation frequency, gain factor and cutting force that ensure the implementation of the requirements of design and technological documentation at finishing treatment. The results obtained are of practical use and contribute to the reduction of manual finishing works.

Keywords: finishing treatment, chamfer size, surface roughness, optimization, robotic complex, edge trimming, automation

Information about the article: Received June 05, 2019; accepted for publication July 15, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Sidorova A.V., Ponomarev B.B. Determination of optimal combination of industrial robot control parameters in a part edge processing robotic complex. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):723–730. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-723-730

1. ВВЕДЕНИЕ

Для снятия заусенцев, облоя и притупления кромок деталей в производственных условиях применялась (и до сих пор используется) ручная слесарная обработка. Вместе с тем на сегодняшний день имеется ряд современных методов и путей, обеспечивающих замену ручного человеческого труда [1, 2]. Перспективным направлением решения этих задач является применение промышленных роботов (ПР). Для этого манипулятор промышленного робота должен иметь не менее шести степеней свободы, а робототехнический комплекс (РТК) – современную систему управления, что позволяет использовать автоматизированную систему для выполнения основных технологических операций механообработки деталей. Преимущество ПР состоит в том, что в отличие от используемых для тех же целей специальных станков роботы менее металлоемки и, благодаря многозвенной кинематике, позволяют обрабатывать крупногабаритные детали сложной формы и геометрии при малом количестве переустановок [1, 3, 4].

Повышение эффективности и, в частности, производительности и точности выполнения зачистных операций в условиях роботизированной производственной системы связано с необходимостью проведения исследований, направленных на совершенствование структур, методов и режимов управления роботом [5–8]. Такие исследования помогут при разработке и внедрении технологии финишной обработки деталей изделий авиационной техники.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Как известно, при разработке технологических процессов механической обработки необходимо обоснованно назначить режимы резания с учетом возможностей

оборудования, используемого инструмента, материала заготовки и других факторов [9].

Существует несколько методов назначения режимов резания: табличный, аналитический, графоаналитический, машинный (с использованием компьютеров и специальных программ расчета) [9]. Сущность машинного метода заключается в использовании компьютеров и специальных программ, разработанных на основе теоретических зависимостей по определению параметров процесса резания и режимов обработки, обеспечивающих заданные параметры качества и точности обработки с учетом экономической целесообразности.

В производственных условиях, наряду с заданной точностью обработки, иногда требуется обеспечить параметры, характеризующие поверхностный слой (параметры шероховатости обрабатываемой поверхности) с целью обеспечения тех или иных эксплуатационных показателей [10].

На сегодняшний день размер притупления кромок S регламентируется ОСТ 1 00022-80¹ и варьирует для наружных углов 0,1–0,4 мм, для внутренних – 0,2–0,8 мм.

По ГОСТ 30893.1–2002 (ИСО 2768-1-89)² предусмотрены предельные отклонения притупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок):

– для точного (f) и среднего (m) классов точности – $\pm 0,2$ мм;

– для грубого (s) и очень грубого (v) классов точности – $\pm 0,4$ мм.

По отраслевому стандарту авиационной промышленности ОСТ 1.000.22-80 предельные отклонения притупленных кромок составляют $\pm 0,3$ мм.

На основании экспериментальных данных установлено, что значения размера фаски изменяются в диапазоне от 0,09 до 0,6 мм, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 30893.1–2002 для точного и среднего классов точности.

Шероховатость поверхности скругленных кромок должна соответствовать



требованиям чертежа на обрабатываемые детали (например, для деталей самолета шероховатость обработанных поверхностей должна соответствовать R_a 3,2).

Полученные результаты по точности размера фаски и параметрам шероховатости процесса будут являться основой для оптимизации параметров обработки кромок деталей.

3. КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Оптимизация технологических условий обработки деталей включает решение различных технологических, экономических, конструкторских и организационных задач. В оптимизации обычно принимают в качестве критериев следующие:

- критерий минимальной технологической себестоимости выполнения операции;
- критерий максимальной производительности, обеспечивающий наименьшие затраты времени на обработку и наибольшую выработку на рабочем месте;
- критерий точности обработки и параметров качества поверхностного слоя.

В данной работе оптимизация проводится по критерию точности обработки и параметру шероховатости поверхностного слоя.

Параметры обработки, обеспечивающие заданные требования к микрогеометрии поверхностного слоя и точности обработки, применительно к регулируемому и управляемому процессу в общем случае могут быть определены следующим образом:

$$(R_a, C) = f(S, n, F, KR), \quad (1)$$

где R_a – шероховатость поверхности фаски, мкм; C – размер фаски, мм; S – подача, мм/мин; n – частота вращения шпинделя, об/мин; F – удерживающая сила, Н; KR – коэффициент усиления.

Снижение или превышение значений управляемых параметров в сравнении с оптимальными приводит к значительному росту сил резания и снижению чувствительности адаптивной системы, что оказывает влияние на параметры качества поверхностного слоя и точность обработки [11, 12].

Таким образом, оптимизацию по критерию точности обработки и параметру качества поверхностного слоя следует осуществлять при проектировании новых технологических процессов. В действующем производстве рекомендуется использовать метод технически обоснованного назначения режима резания.

В общем случае отклонение от оптимальной величины любого из целевых показателей качества (в сторону увеличения или уменьшения действительной величины показателя) влечет за собой ухудшение эксплуатационных свойств детали [13]. Поскольку эти показатели имеют различные единицы измерения, то необходимо использовать их относительное, а не абсолютное изменение от оптимальной величины. В качестве целевой функции оптимизации предложено использовать функцию следующего вида:

¹ОСТ 1.000.22-80. Отраслевой стандарт. Предельные отклонения размеров от 0,1 до 10000 мм и допуски формы и расположения поверхностей, не указанные на чертеже. Распоряжение Министерства № 8185628; заявл. 19.09.1980; опублик. 01.07.1981. / GOST 1.000.22-80. Industry standard. Limit deviations of sizes from 0.1 to 10000 mm and tolerances of surface shapes and location not shown in the drawing. Ministry Order No. 8185628; declared 19 September 1980; publ. 1 July 1981.

²ГОСТ 30893.1-2002 (ИСО 2768-1-89). Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками. Постановление Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии № 22-ст. Введ. 01.01.2004; изм. 12.09.2018. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2018. /GOST 30893.1-2002 (ISO 2768-1-89). Basic norms of interchangeability. General tolerances. Limit deviations of linear and angular dimensions with unspecified tolerances. Resolution of the State Committee of the Russian Federation for Standardization and Metrology No. 22-st. Introduced 1 January 2004; revised 12 September 2018. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 2018.

$$f(R_{a0}, C_0) = \kappa_1 \left(\frac{R_a - R_{a0}}{R_{a0}} \right)^2 + \kappa_2 \left(\frac{C - C_0}{C_0} \right)^2 \quad (2)$$

либо при использовании обозначений типа $q_1 = R_a$, $q_2 = C$ применять функцию общего вида:

$$f(Q) = \sum_{i=1}^n k_i \left(\frac{q_i - q_{i0}}{q_{i0}} \right)^2, \quad (3)$$

где k_i – соответствующие весовые коэффициенты, позволяющие установить вклад того или иного показателя качества поверхностного слоя детали в ее обобщенную характеристику; R_a , C – текущие значения высоты неровностей, размера фаски; n – число показателей качества; Q – комплекс показателей качества.

Определив весовые коэффициенты k_1 и k_2 методом ранжирования [14], где для каждого критерия устанавливается определенный ранг важности, приводится формула целевой функции оптимизации:

$$f(R_{a0}, C_0) = \left(\frac{R_a - R_{a0}}{R_{a0}} \right)^2 + 0,4 \left(\frac{C - C_0}{C_0} \right)^2. \quad (4)$$

В том случае, когда при решении оптимизационной задачи удастся обеспечить точное совпадение заданных параметров качества и точности с расчетными, величина целевой функции будет равна нулю, т.е. $f(Q) = 0$. В противном случае, когда хотя бы один из расчетных параметров будет отличаться от заданного, целевая функция будет положительной, т.е. $f(Q) > 0$. Поэтому целевая функция в процессе оптимизации должна быть сведена к минимуму.

4. ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАБОТКОЙ КРОМОК ДЕТАЛЕЙ

С целью определения оптимальных значений параметров, управляющих робототехнической системой автоматизации операций фрезерования кромок деталей после их механической обработки, разра-

ботан алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 1.

Представленный алгоритм программы позволяет определять оптимальные режимы обработки, исходя из заданных в чертеже параметров шероховатости и размера фаски.

На первом этапе алгоритм предполагает ввод данных, которые требуется получить после выполнения финишной операции, это могут быть требуемые размеры фаски, регламентируемые отраслевым стандартом, требования к шероховатости и ограничение по максимальной силе резания.

Программа осуществляет расчет размера фаски и параметр шероховатости поверхности по эмпирическим формулам, представленным в работе [15], сравнивает расчетные значения с предельно допустимыми, если они не противоречат требованиям к чертежу, затем рассчитывает целевую функцию оптимизации по формуле (4) и записывает результат в массив. Далее программа ищет минимальное значение массива, т.е. минимальную разницу между требуемым показателем и рассчитанным. На основании найденного значения записываются соответствующие управляемые параметры, они и будут являться оптимальными по критерию точности обработки и параметру шероховатости поверхностного слоя. Если совпадения отсутствуют, то требуется корректировка ввода данных.

Для обеспечения размерной обработки, связанной с удалением заусениц, образовавшихся после предыдущей обработки, притуплением кромок и образованием фаски заданного размера, а также для получения параметра шероховатости (нормированного конструкторской документацией) разработан модуль программного обеспечения, позволяющий автоматизировать основные расчеты по подбору параметров обработки поверхностей в условиях РТК и прогнозированию результатов обработки. Программный модуль разработан с помощью Microsoft Visual Studio 2017. Программа позволяет определять оптимальные параметры обработки (S , n , KR , F) ис-

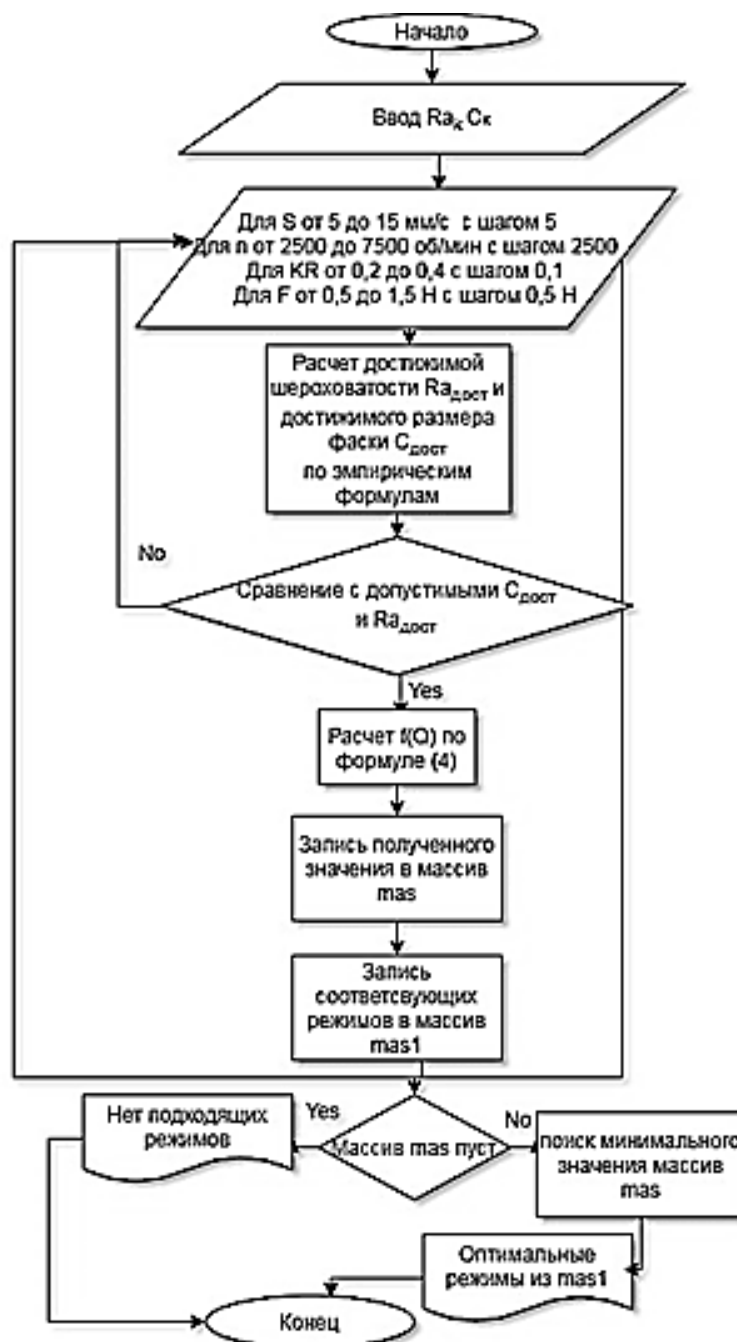


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения управляющих параметров финишной обработки деталей
Fig. 1. Block diagram of the algorithm for determining control parameters of finishing machining of parts

ходя из размеров фаски обрабатываемой кромки, а также шероховатости, заданной в чертеже. Окно этой программы представлено на рис. 2.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, полученных в ходе выполнения научно-

исследовательской работы, разработана система, позволяющая определить оптимальные параметры управления процессом размерной обработки кромок деталей промышленным роботом. В качестве критерия оптимизации обоснованно принят размер фаски, образуемой при обработке, и параметры шероховатости поверхностного слоя.



Рис. 2. Окно программы определения оптимальных режимов обработки кромок деталей
Fig. 2. Window of the program for determining part edge optimal processing modes

Система оптимизации включает алгоритм и программу подбора оптимальных управляющих параметров процесса образования кромок деталей, которые позволяют выбрать оптимальные настроечные параметры обработки: подачу, частоту вращения шпинделя, коэффициент усиления и силу резания.

На основе математической модели, установившей взаимосвязь варьируемых параметров управления процессом образования кромок деталей с конструкторско-технологическими требованиями к их размерам и качеству, разработан алгоритм и программное обеспечение автоматизиру-

ванного поиска оптимальных решений. Разработанное программное обеспечение успешно использовалось при проведении экспериментальных исследований и позволило получить при обработке размеры фаски и шероховатость поверхности в пределах, заданных чертежом. Результаты исследований должны найти дальнейшее применение при разработке и внедрении технологии финишной обработки деталей изделий авиационной техники и быть полезны при проектировании и введении в эксплуатацию робототехнических комплексов и систем.

Библиографический список

1. Иванова А.В., Пономарев Б.Б., Савилов А.В., Чапышев А.П. Робототехнический комплекс удаления заусенцев после фрезерования деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 11 (82). С. 49–53.
2. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-2. С. 533–537.
3. Peng Jingfu, Ding Ye, Zhang Gang, Ding Han. An

- enhanced kinematic model for calibration of robotic machining systems with parallelogram mechanisms // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2019. Vol. 59. P. 92–103.
4. Hong-an Yang, Shuai Cao, Luoyu Bai, Zhaoqi Zhang, Jie Kong. A distributed and parallel self-assembly approach for swarm robotics // Robotic Automation System. 2019. Vol. 118. P. 80–92.
5. Ivanova A., Belomestnyh A., Semenov E., Ponomarev B. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details // International Journal



- of Engineering and Technology. 2015. Т. 7. № 5. С. 1774–1780.
6. Semyonov E.N., Sidorova A.V., Pashkov A.E., Belomestnykh A.S. Accuracy assessment of Kuka KR210 R2700 extra industrial robot // *International Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 16. No. 1. P. 19–25.
7. Sidorova A.V., Semyonov E.N., Belomestnykh A.S. Robotic edge machining using elastic abrasive tool // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 11 Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 - Simulation and Automation of Production Engineering" (г. Томск, 04–06 декабря 2017 г.). Томск, 2017. С. 022097. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022097
8. Бакшеева Е.Н., Беломестных А.С., Семенов Е.Н. Анализ процесса врезания на операциях фрезерования кромок на робототехническом комплексе // *Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей X Междунар. науч.-техн. конф. (Иркутск, 21–26 мая 2018 г.)*. Иркутск, 2018. С. 163–171.
9. Безязычный В.Ф., Киселев Э.В. Расчет режимов резания, обеспечивающих комплекс требуемых параметров точности обработки и качества поверхностного слоя // *Металлообработка*. 2016. № 6 (96). С. 9–17.
10. Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А., Кольцов В.П.,

Нгуен Тхе Хоанг. Определение степени покрытия после дробеударного формообразования методом обработки изображений // *Системы. Методы. Технологии*. 2018. № 2 (38). С. 32–37.

11. Пономарев Б.Б., Хьен Нгуен Ши. Влияние ориентации инструмента на силы резания при концевом фрезеровании // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2019. № 3 (708). С. 11–20. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20

12. Ponomarev B.B., Hien Nguyen Sy. Finish milling dynamics simulation considering changing tool angles // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. Issue 2. P. 022083. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022083

13. Xiaoyi Gu, Changsheng Li, Xiao Xiao. A Compliant Transoral Surgical Robotic System Based on a Parallel Flexible Mechanism // *Annals of biomedical engineering*. 2019. Vol. 47. Issue 6. P. 1329–1344.

14. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / пер. с англ. М.: Мир, 1980. 610 с.

15. Сидорова А.В. Модель управления точностью обработки на операции фрезерования кромок на РТК // *Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей IX Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 12–15 апреля 2017)*. Иркутск, 2017. С. 246–250.

References

1. Ivanova A.V., Ponomarev B.B., Savilov A.V., Chapyshev A.P. Robotic system performing deburring after part milling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 11 (82), pp. 49–53. (In Russ.).
2. Chapyshev A.P., Ivanova A.V., Kryuchkin A.V. Technological capabilities of processes of details mechanized finishing processing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6-2, pp. 533–537. (In Russ.).
3. Peng Jingfu, Ding Ye, Zhang Gang, Ding Han. An enhanced kinematic model for calibration of robotic machining systems with parallelogram mechanisms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, vol. 59, pp. 92–103. DOI:10.1016/j.rcim.2019.03.008
4. Hong-an Yang, Shuai Cao, Luoyu Bai, Zhaoqi Zhang, Jie Kong. A distributed and parallel self-assembly approach for swarm robotics. *Robotic Automation System* 2019, vol. 118, pp. 80–92.
5. Ivanova A., Belomestnykh A., Semenov E., Ponomarev B. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge. *International Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 1774–1780.
6. Semyonov E.N., Sidorova A.V., Pashkov A.E., Belomestnykh A.S. Accuracy assessment of Kuka KR210

R2700 extra industrial robot. *International Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 19–25.

7. Sidorova A.V., Semyonov E.N., Belomestnykh A.S. Robotic edge machining using elastic abrasive tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 11 Series "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 – Simulation and Automation of Production Engineering" (Toms, 04–06 December 2017). Toms, 2017, p. 022097. (In Russ.). DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022097

8. Baksheeva E.N., Belomestnykh A.S., Semenov E.N. *Analiz processa vrezaniya na operatsiyah frezerovaniya kromok na robototekhnicheskoy komplekse* [Analysis of the penetration process in edge milling operations on a robotic complex]. *Sbornik statej X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collected articles of X International scientific and technical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia", Irkutsk, 21–26 May 2018]. Irkutsk, 2018, pp. 163–171. (In Russ.).

9. Bezlyazychny V.F., Kiselev E.V. Calculation of cutting modes, providing a set of the required parameters of accuracy processing and quality of the surface layer. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2016, no. 6 (96), pp. 9–17. (In Russ.).

10. Le Chi Vinh, Starodubceva D.A., Kol'cov V.P., Nguen The Hoang. Determination of a degree of shot coverage after shot peen forming by image processing.

Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 2 (38), pp. 32–37. (In Russ.).

11. Ponomarev B.B., Hien Nguyen Shi. The influence of tool orientation on cutting forces during end milling. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2019, no. 3 (708), pp. 11–20. (In Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2019-3-11-20

12. Ponomarev B.B., Hien Nguyen Shi. Finish milling dynamics simulation considering changing tool angles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 327, issue 2, p. 022083. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022083

13. Xiaoyi Gu, Changsheng Li, Xiao Xiao. A Compliant Transoral Surgical Robotic System Based on a Parallel Flexible Mechanism. *Annals of biomedical engineering*,

2019, vol. 47, issue 6, pp. 1329–1344.

14. Johnson N. Statistics and experimental design in engineering and science. *Methods of experimental design*, 1980. 610 p. (Russ. ed.: *Statistika i planirovaniye eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody obrabotki dannyh*. Moscow, Mir Publ., 1980, 610 p.).

15. Sidorova A.V. *Model' upravleniya tochnost'yu obrabotki na operacii frezerovaniya kromok na roboto-tekhnicheskom komplekse* [A model of edge milling accuracy control at a robotic complex]. *Sbornik statej IX Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri"* [Collected articles of IX All-Russian scientific and practical conference "Aviation Engineering and Transport of Siberia", Irkutsk, 12–15 April 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 246–250. (In Russ.).

Критерии авторства

Сидорова А.В., Пономарев Б.Б. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидорова Алена Владимировна,

младший научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; ✉ e-mail: alena91@istu.edu

Пономарев Борис Борисович,

профессор, доктор технических наук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; e-mail: pusw@istu.edu

Authorship criteria

Sidorova A.V., Ponomarev B.B. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alena V. Sidorova,

Junior Researcher of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; ✉ e-mail: alena91@istu.edu

Boris B. Ponomarev,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; e-mail: pusw@istu.edu



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.923.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-731-742>

Выбор штамповых сталей холодного деформирования по критерию шероховатости плоских деталей при CBN-шлифовании инструментами нормальной пористости

© Я.И. Солер, С.Н. Дроzhzhин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – оценить обрабатываемость штамповых сталей шлифованием пяти марок нитридборовым кругом CBN30 B107 100 0 VK27 стандартной пористости по минимуму высотных параметров R_a , R_z , R_{max} и средних шагов $S_{ш}$, максимуму t_p , измеренных в поперечном направлении (вдоль оси CBN-круга), а также наименьшему значению их дисперсий рассеяния. В связи с наблюдением нарушения однородности дисперсий и нормальности распределений их интерпретация проведена с привлечением непараметрической статистики, частотами которой служат медианы и квартильные широты. По мере положения высотные шероховатости следует разбить на три группы по принципу возрастания их величин: 1 – стали X12, X12M; 2 – Y10A; 3 – X12Ф, ХВГ. Их рост рассчитан в пределах трех категориальных величин. Наибольшая стабильность процесса имеет место при шлифовании деталей холодной листовой штамповки из стали X12M. Штамповые стали следует выбирать с учетом их шлифуемости, а также служебного назначения деталей.

Ключевые слова: шлифование, штамповые стали, шероховатость поверхностей, статистика, меры положения и рассеяния

Информация о статье: Дата поступления 12 марта 2019 г.; дата принятия к печати 11 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Солер Я.И., Дроzhzhин С.Н. Выбор штамповых сталей холодного деформирования по критерию шероховатости плоских деталей при CBN-шлифовании инструментами нормальной пористости. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. 23(4):731–742. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-731-742

Selection of cold rolled die steels by the roughness criterion of flat parts at CBN-grinding by normal porosity tools

Yakov I. Soler, Sergei N. Drozhzhin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to evaluate the machinability of die steels of five brands by the CBN grinding wheel CBN30 B107 100 0 VK27 of standard porosity by a minimum of altitude parameters R_a , R_z , R_{max} , average pitch $S_{ш}$, maximum t_p measured in the transverse direction (along the axis of the CBN-wheel), as well as by the lowest value of their scattering dispersions. Having observed the lack of dispersion homogeneity and distribution normality they are interpreted with the help of nonparametric statistics, the frequencies of which are medians and quartile latitudes. According to the location pitch roughness should be classified into three groups by the principle of their value increase: 1 – steels Cr12, Cr12Mo; 2 steel – C10A; 3 steels – Cr12V, CrWMn. Their growth is calculated within three categorical values. The process is characterized with highest stability when grinding die stamping parts made of steel Cr12Mo. Die steels should be selected with regard to their grindability and part purpose.

Keywords: grinding, die steels, surface roughness, statistics, position and dispersion measures

Information about the article: Received March 12, 2019; accepted for publication July 11, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Soler Ya.I., Drozhzhin S.N. Selection of cold rolled die steels by the roughness criterion of flat parts at CBN-grinding by normal porosity tools. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019; 23(4):731–742. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-731-742

1. ВВЕДЕНИЕ

Плоское шлифование широко используется для окончательной обработки формообразующих деталей штампов холодной листовой штамповки (ХЛШ): плоских базовых поверхностей матриц, сопрягаемых граней сборных матриц, уплотненных базовых и рабочих плоскостей пуансонов и т.п., к которым предъявляются повышенные требования по шероховатости поверхности. Снижение высотных шероховатостей повышает контактную жесткость, износостойкость, статическую (R_a) и усталостную (R_{max}) прочность. Среди регламентируемых параметров шероховатости наименее изученными представлены ее шаговые величины S , S_m и относительные опорные длины t_p , где $p = 5-95\%$, которые слабо коррелированы с технологическими параметрами процесса шлифования. Для повышения стойкости штампов ХЛШ все параметры шероховатости (за исключением t_p) следует минимизировать, а относительную опорную поверхность, напротив, максимизировать. Полагают, что параметр t_p не зависит от условий шлифования. Однако он возрастает по мере удаления сечения $p \in [5; 95\%]$ от вершины наибольшей высоты R_{max} [1–4].

Абразивная обработка протекает при значимой нестабильности процесса, которая снижает качество получаемой поверхности деталей. Сказанное обусловлено колебаниями режущей способности абразивного инструмента, который формируется неориентированным закреплением абразивных зерен (в связке круга), широким разнообразием их формы, углов резания и количества самих режущих кромок на единицу ширины инструмента. В кругах из сверхабразивов дополнительно может присутствовать неравномерное размещение зерен по толщине режущего слоя. Изложенное приводит к колебаниям снимаемой толщины среза металла, сил резания и усиливает рассеяние наблюдений. В настоящее время для их интерпретации

наибольшее распространение получил параметрический метод статистики, частотами которого служат среднее значение и дисперсия. Однако большинство исследователей не учитывают того, что использование параметрического метода статистики предполагает, что наблюдения имеют нормальное распределение, а их дисперсии характеризуются однородностью. На практике указанные требования к наблюдениям при шлифовании в полном объеме чаще всего не выполняются, в силу чего надежность принимаемых статистических гипотез параметрического метода снижается. В такой ситуации целесообразнее воспользоваться непараметрическим методом статистики, который относительно наблюдений свободен от всяких ограничений. В нем в качестве частот случайных величин используются медианы и квартильные ширины [5, 6].

На машиностроительных предприятиях детали штампов преимущественно шлифуют кругами из традиционных абразивов российскими инструментами 95AF46L6V20, 25AF46L6V20, 95AF60L6V20, 95AF90L6V20, 92A/25AF46L6V20, 25AF46L10V5–КФ35, 25AF60M10V5–ПО. Реже используют круги зарубежного производства 08C046I12VOP2 (фирма «MoleMab», Италия) и 5SG60K12VXP («Norton», США). По результатам [7], точечные и интервальные оценки параметров качества чистового шлифования деталей штампов ХЛШ следует вести кругами на основе хромтитанистого электрокорунда 95AF46L6V20. Появление нового суперабразива типа кубического нитрида бора (КНБ): эльбора российского производства ЛКВ (принятые зарубежные аббревиатуры – CBN, ABN) – привело к повышению эффективности шлифования труднообрабатываемых сплавов (никелевых, титановых) и быстрорежущих сталей. Никелевые и титановые сплавы эффективнее шлифовать высокопористыми кругами (ВПК) КНБ, а для быстрорежущих сталей в связи с образованием более мелкой стружки, способной размещаться в межзеренном ограниченном пространстве, использовать круги КНБ



стандартной пористости [8–10]. В работе [11] показана эффективность шлифования быстрорежущих пластин также нитридовыми ВПК.

Гипотетически средняя высота профиля шероховатости (без учета весовых коэффициентов) представляется выражением [3]:

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^4 \sum_{v=1}^n h_{iv1}, \quad v = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где h_1 – составляющая профиля, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения режущей части абразивного зерна; h_2 – составляющая профиля, формируемая колебаниями абразивного круга относительно шлифуемой поверхности; h_3 – составляющая микронеровностей, образуемая пластическим деформированием поверхности в зоне контакта круга с заготовкой, h_4 – составляющая профиля шероховатости рабочих кромок зерна («слепок» виде остаточных гребешков, копирующих его режущую часть), $v = \overline{1, n}$ – число параллельных опытов.

В работе [3] элементарные составляющие шероховатости h_i , $i = \overline{1; 4}$ в (1) представлены систематическими величинами. В условиях маятникового шлифования профиль микрорельефа поверхности детали формируется под воздействием большого числа активных режущих кромок абразивных зерен, многократно проходящих в одном и том же сечении, формируя случайным образом микрогеометрию поверхности детали.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведение натурного эксперимента и статистическая обработка полученных

наблюдений составляют два этапа проведения методики исследования.

Для натурных опытов использовали плоскошлифовальный станок модели ЗГ71. Объектом исследования служили образцы с размерами $D \times H = 40 \times 40$ мм, шлифуемые по торцу в конце цикла без выхаживания; штамповые стали представлены в термообработанном состоянии [12, 13]: X12 ($i=1$), X12M ($i=2$), X12Ф ($i=3$), ХВГ ($i=4$), У10А ($i=5$); форма, размеры и характеристика нитридового круга – 1А1 200×20×76×3 мм CBN30 В107 100 0 VK27. Режим шлифования: скорость круга $v_k = 29$ м/с, продольная подача $S_{np} = 6$ м/мин, глубина резания t_j , $j = \overline{1; 2}$: $t_1 = 0,005$ мм, $t_2 = 0,01$ мм; смазочно-охлаждающая жидкость – 5% эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин. Число параллельных опытов $n = 30$ ($v = \overline{1; 30}$). Врезание круга в деталь вели после его опускания на глубину t при смещении продольного стола с заготовкой в крайнее левое положение относительно оператора и его вращении по часовой стрелке. В данном случае срезание металла протекает в условиях встречного шлифования. Обратное движение стола с заготовкой в исходное положение рассматриваем выхаживающим, которое окончательно формирует поверхность детали в условиях одноименных движений v_k и S_{np} .

Параметры микрорельефа (ГОСТ 25142-82¹): R_a , R_q , R_z , R_{max} , S , S_m и t_p , $p = 5 - 95\%$ – измерены на профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр» в двух взаимно ортогональных направлениях ($d = 1, 2$): 1 – в направлении

вектора S^n , 2 – параллельно вектору S^{np} .

В условиях использования статистических методов выходные параметры

¹ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Введ. Постановлением № 730 Государственного комитета СССР по стандартам 01.01.1983. М.: Изд-во стандартов, 1982. 22 с. / GOST 25142-82. Surface Roughness. Terms and Definitions. Introduced by the Resolution No. 730 of the USSR State Committee for Standards and Metrology of 1 January 1983. Moscow: Publishing house of standards, 1982. 22 p.

шлифования удобно представлять функцией y_{dij} . Базовый вариант шлифования с учетом методики эксперимента задан следующим кодом: $d = i = j = 1$. Альтернативные условия шлифования приняты при $d = i = j = 2$. Прикладная статистика предполагает анализ наблюдений в виде последовательностей:

$$\{y_{dij}\}_v, v = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где в (2) принято постоянное $n = 30$, повышающее надежность прогнозирования выходных параметров процесса шлифования.

С учетом условий эксперимента для (2) параметры одномерного распределения частот примут вид [5, 6]:

* – меры положения (опорные данные по ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002²): для параметрического метода – средние

$$\bar{y}_{dij} = y_{dij\bullet}, \quad (3)$$

где «•» в конце индексов свидетельствует об осреднении опытов по v ;

– для непараметрического метода – медианы

$$\tilde{y}_{dij}; \quad (4)$$

* – меры рассеяния (прецизионность по ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002²), характеризующие стабильность процесса: стандарты отклонений SD_{dij} (дисперсии SD_{dij}^2), размахи $R_{dij} = (y_{\max} - y_{\min})_{dij}$ – для параметрического метода; квартильные широты (КШ) $= (y_{0,75} - y_{0,25})_{dij}$ – для его «негауссовского» конкурента;

* – меры формы распределений, в частности асимметрия (скошенность), при-

ближенно вычисляемая из выражения [6]:

$$A_{s(dij)} = [3(\bar{y} - \tilde{y}) / SD]_{dij}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что асимметрия является положительной величиной, когда $(\bar{y} > \tilde{y})_{dij}$. В противном случае $A_s < 0$. При $A_s = 0$ распределение (2) рассматривается нормальным.

Для ускорения вычислений при интерпретации (2) и снижения риска ошибок при проведении трудоемких расчетов привлечена программа Statistica 6.1.478.0. Для подтверждения нуль-гипотезы (H_0) о нормальном распределении (2) использован критерий Шапиро-Уилка, который имеет место при выполнении следующего неравенства [5, 6]:

$$\alpha > 0,5, \quad (6)$$

где α – надежность принятия H_0 .

Как указано выше, для использования параметрического метода статистики (2) должны обладать свойством гомоскедастичности. Их гомогенность проверена по тестам ($q = \overline{1; 3}$): 1 – Хартли, Кохрена и Бартлетта, представленными в программе одной совокупностью, 2 – Левене, 3 – Брауна – Форсайта, которые должны удовлетворять неравенству:

$$p < 0,05, \quad (7)$$

где p – ошибка принятия H_0 .

Вероятностный характер гипотез может сопровождаться тем, что отдельные решения (7), принятые по $q = \overline{1; 3}$, могут различаться между собой. Окончательные результаты анализа (2) принимаются из условия:

²ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения. Введ. Постановлением № 161-ст Госстандарта России 01.11.2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 24 с. / GOST R ISO 5725-1-2002. Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General provisions and definitions. Introduced by the Resolution No. 161-st of the State Committee of the Russian Federation for Standardization and Metrology of 1 November 2002. Moscow: Publishing house of standards, 2002. 24 p.



дисперсии однородны (H_0) – при $f_0 \in [2; 3]$; неоднородны (H_1) – при $f_1 \in [2; 3]$.

Из теоретической статистики известно, что параметрический метод предъявляет наиболее строгие требования к однородности дисперсий. Нормальность распределений частично повышает надежность принятых параметрических гипотез.

Для обоих методов статистик выходные параметры процесса, полученные при переменных условиях: три, и более уровней (например, для $i \geq 3$), должны анализироваться в два последовательно выполняемых этапа. Первоначально следует выявить факт наличия такой значимой изменчивости уровней откликов (3), (4) с использованием одномерного дисперсионного анализа без поименного их поиска. В случае подтверждения данного явления проводим их множественный анализ с предсказанием ожидаемых мер положения: $\hat{y}_{dij}$ и $m\hat{y}_{dij}$. Обе процедуры подробно описаны в работах [14, 15].

Для количественной оценки стабильности процесса привлечен индекс воспроизводимости C_p (ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002²), который для множества (2) представляется выражением [16]:

$$C_p = (USL - LSL) / 6SD \quad (8)$$

с индексами ($dij \bullet$) – для параметрического метода и (dij) для его непараметрического конкурента. В (8) использованы обозначения: USL , LSL – наибольшие и наименьшие предельные отклонения в (2), разность которых равна рангу R .

Влияние непараметрического метода на меры положения оцениваем медианными коэффициентами при неизменных (dij):

$$K_{m(dij)} = (m\hat{y} / \hat{y}_{\bullet})_{dij} \quad (9)$$

Оценки переменных (альтернативных) условий шлифования относительно базового ведем для обеих характеристик одновременного распределения частот (2)

при одноименных $d = \overline{1; 2}$:

$$K_{di} = (m\hat{y}_i / m\hat{y}_1)_{dj}; \quad (10)$$

$$K_{dj} = (m\hat{y}_2 / m\hat{y}_1)_{di}; \quad (11)$$

$$K_{cm(dij)1} = (SD_1 / SD_i)_{dj}; \quad (12)$$

$$K_{cm(dij)2} = (R_1 / R_i)_{dj}; \quad (13)$$

$$K_{cm(dij)3} = (KIII_1 / KIII_i)_{dj}. \quad (14)$$

В (12)–(14) переменными в коэффициентах стабильности представлены шлифуемые стали $i = \overline{2, 5}$ относительно базовой стали X12 ($i = 1$).

Аналогично рассмотрены $K_{cm(dij)k}$, $k = \overline{1, 3}$ при переменной глубине $j = \overline{1, 2}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе статистического анализа (2) при глубине шлифования $t = 0,005$ мм проведена процедура поиска возможности привлечения параметрического метода для интерпретации параметров шероховатости: $(R_a, R_q, R_z, R_{max}, S, S_m, t_{50})_d$, $d = \overline{1, 2}$.

Относительно однородности дисперсий установлено, что H_0 приняты по всем высотным параметрам в поперечном направлении ($d = 1$), которые являются наибольшими и регламентируют качество поверхности, и шагам S_1 по всем критериям $q = \overline{1, 3}$. В ортогональном направлении ($d = 2$) сказанное по H_0 подтверждено только по двум параметрам – $(R_a, R_{max})_2$ в продольном направлении.

Нормальность распределений (2) протестирована для каждого параметра шероховатости по каждой марке инструментальной стали $i = \overline{1, 5}$ и составила $14 \times 5 = 70$ процедур. Из них только в 11-ти

случаях предсказана нормальность распределений. На рис. 1 представлены гистограммы шероховатостей для параметра R_{a1} с наложенной кривой нормального распределения по всем шлифуемым сталям.

Установлено, что только для стали X12Ф (см. рис. 1 с) по (6) принята H_0 о нормальном распределении наблюдений при $\alpha = 0,8054$. Учитывая сказанное выше, интерпретация (2) в дальнейшем проведена с привлечением непараметрических статистик.

В табл. 1 представлены опытные и прогнозируемые меры положения основных параметров шероховатостей и коэффициенты (9)–(11) для них.

Наблюдаемые медианы $\tilde{y}_i$ высотных параметров и средних шагов оказались меньше средних $y < 0$ или (реже) равны им. Сказанное количественно подтвержде-

но медианными коэффициентами $k_m \leq 1$. Отмеченная закономерность характеризует наиболее благоприятное снижение шероховатостей по непараметрическим статистическим гипотезам. Для относительной опорной длины профиля коэффициент $K_m = 0,54 - 1,01$, что также предполагает формирование благоприятного микрорельефа с более высокой долговечностью детали [3]. На рис. 2 представлены описательные непараметрические статистики для параметра R_{a1} , полученные при шлифовании с глубиной $t = 0,005$ мм. На нем выделены опытные медианы $\tilde{y}_{1i1}$, «прямоугольником» – $KШ_{1i1} = |y_{0,75} - y_{0,25}|_{1i1}$, включающие 50% наблюдений (2), «усиками» – размахи $R_{1i1} = |y_{max} - y_{min}|_{1i1}$.

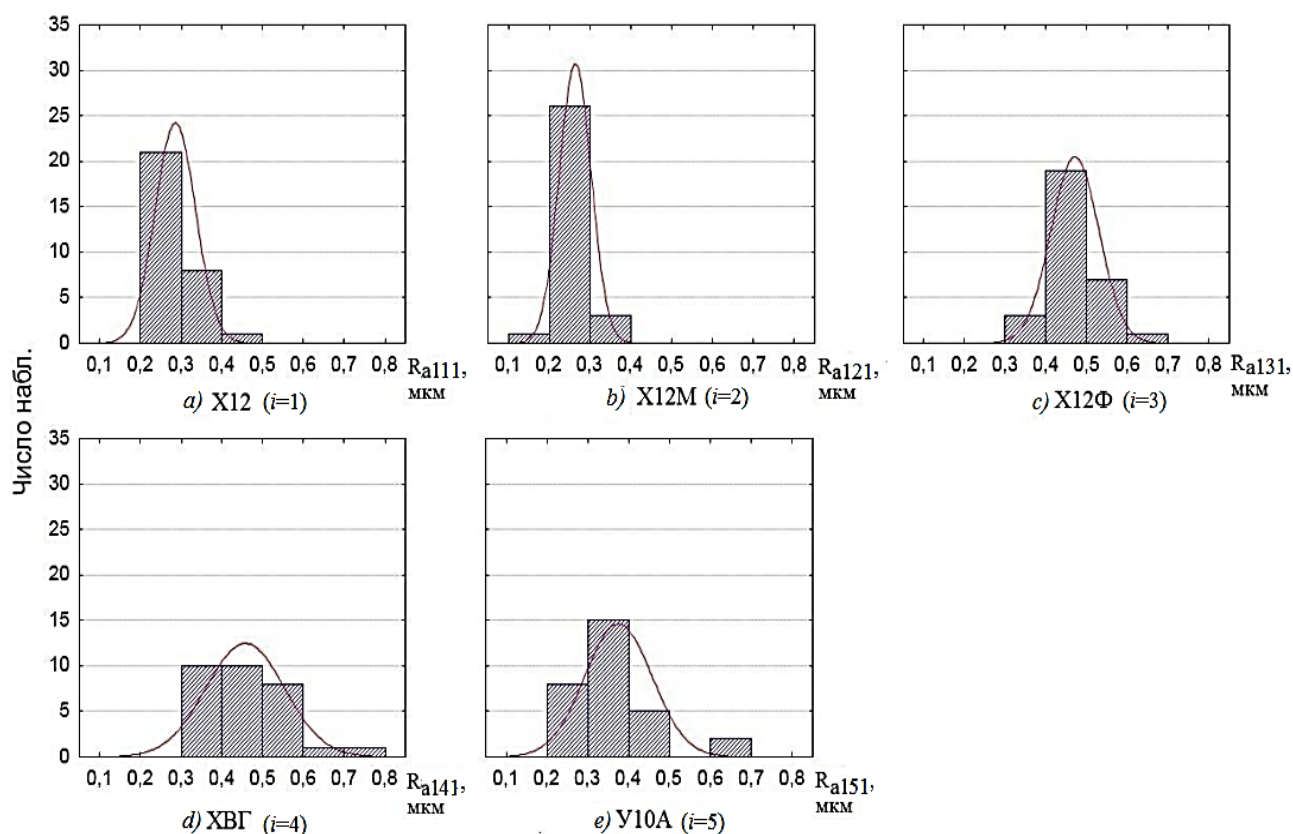


Рис. 1. Гистограммы параметра R_{a1i1} при шлифовании сталей $i = \overline{1,5}$ с наложенной кривой нормального распределения при глубине $t = 0,005$ мм ($j=1$)

Fig. 1. Histograms of the parameter R_{a1i1} when grinding steels $i = \overline{1,5}$ with the superimposed normal distribution curve at the depth of $t = 0.005$ mm ($j=1$)



Таблица 1

Влияние штамповых сталей на опорные значения микрорельефа
и коэффициенты (9)–(11) при шлифовании с $t = 0,005$ мм

Table 1

Influence of die steels on the reference values of microrelief
and coefficients (9)–(11) when grinding at $t = 0.005$ mm

Параметр	Сталь ($i = \overline{1;5}$)	$\bar{y}_i$, мкм	$\tilde{y}_i$, мкм	$\hat{y}_i$, мкм	$m\hat{y}_i$, мкм	K_m (9)	$\bar{K}_i$ (10)	$\hat{K}_i$ (11)
R_{a1i1}	X12(1)	0,28 (0,32*)	0,27 (0,32*)	0,27 (0,32*)	0,26 (0,32*)	0,94	1,00	1,00
	X12M(2)	0,26 (0,32*)	0,26 (0,32*)	0,27 (0,32*)	0,26 (0,32*)	1,00	0,97	1,00
	X12Φ(3)	0,47 (0,50*)	0,47 (0,50*)	0,46 (0,50*)	0,45 (0,50*)	1,00	1,76	1,69
	ХВГ(4)	0,45 (0,50*)	0,42 (0,50*)	0,46 (0,50*)	0,42 (0,50*)	0,93	1,58	1,59
	У10А(5)	0,37 (0,40*)	0,37 (0,40*)	0,37 (0,40*)	0,39 (0,40*)	1,00	1,37	1,49
R_{max1i1}	X12(1)	1,67 (2,0*)	1,60 (1,6*)	1,62 (2,0*)	1,58 (1,6*)	0,96	1,00	1,00
	X12M(2)	1,56 (1,6*)	1,56 (1,6*)	1,62 (2,0*)	1,58 (1,6*)	1,00	0,97	1,00
	X12Φ(3)	2,74 (3,2*)	2,73 (3,2*)	2,67 (3,2*)	2,64 (3,2*)	0,99	1,71	1,67
	ХВГ(4)	2,61 (3,2*)	2,55 (3,2*)	2,67 (3,2*)	2,50 (3,2*)	0,98	1,59	1,58
	У10А(5)	2,20 (2,5*)	2,23 (2,5*)	2,20 (2,5*)	2,39 (2,5*)	1,02	1,39	1,39
R_{z1i1}	X12(1)	1,01 (1,25*)	0,97 (1,0*)	0,99 (1,0*)	0,96 (1,0*)	0,96	1,00	1,00
	X12M(2)	0,97 (1,0*)	0,96 (1,0*)	0,99 (1,0*)	0,96 (1,0*)	0,99	0,99	1,00
	X12Φ(3)	1,66 (2,0*)	1,64 (2,0*)	1,63 (2,0*)	1,57 (1,6*)	0,99	1,69	1,63
	ХВГ(4)	1,54 (1,6*)	1,50 (1,6*)	1,57 (1,6*)	1,49 (1,6*)	0,98	1,56	1,55
	У10А(5)	1,33 (1,6*)	1,33 (1,6*)	1,33 (1,6*)	1,42 (1,6*)	1,00	1,38	1,47
S_{m2i1}	X12(1)	84,89 (100*)	85,17 (100*)	84,32 (100*)	81,43 (100*)	1,00	1,00	1,00
	X12M(2)	82,56 (100*)	79,13 (80*)	83,12 (100*)	81,43 (100*)	0,96	0,93	1,00
	X12Φ(3)	94,77 (100*)	83,94 (100*)	86,72 (100*)	84,52 (100*)	0,89	0,99	1,04
	ХВГ(4)	84,68 (100*)	89,84 (100*)	84,32 (100*)	81,43 (100*)	1,06	1,05	1,00
	У10А(5)	68,72 (80*)	69,09 (80*)	78,69 (80*)	80,81 (100*)	1,01	0,81	0,99
$t_{50(1i1)}$	X12(1)	38,06	35,85	40,08	40,23	0,94	1,00	1,00
	X12M(2)	40,99	42,88	40,86	41,74	1,05	1,20	1,04
	X12Φ(3)	39,21	39,41	40,41	40,23	1,01	1,10	1,00
	ХВГ(4)	47,19	47,80	44,81	44,49	1,01	1,33	1,11
	У10А(5)	43,37	42,78	42,07	41,74	0,99	1,19	1,03

Примечание / Note. В скобках указаны категориальные величины (КВ) по ГОСТ 2789-73³ / Categorical values (KV) according to GOST 2789-733 are shown in parentheses.

³ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 1975-11-01. Взамен ГОСТ 2789-1959. М.: Изд-во стандартов, 1973. 10 с. / GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics. Introduced 1 November 1975. In replacement of GOST 2789-1959. Moscow: Publishing house of standards, 1973.10 p.

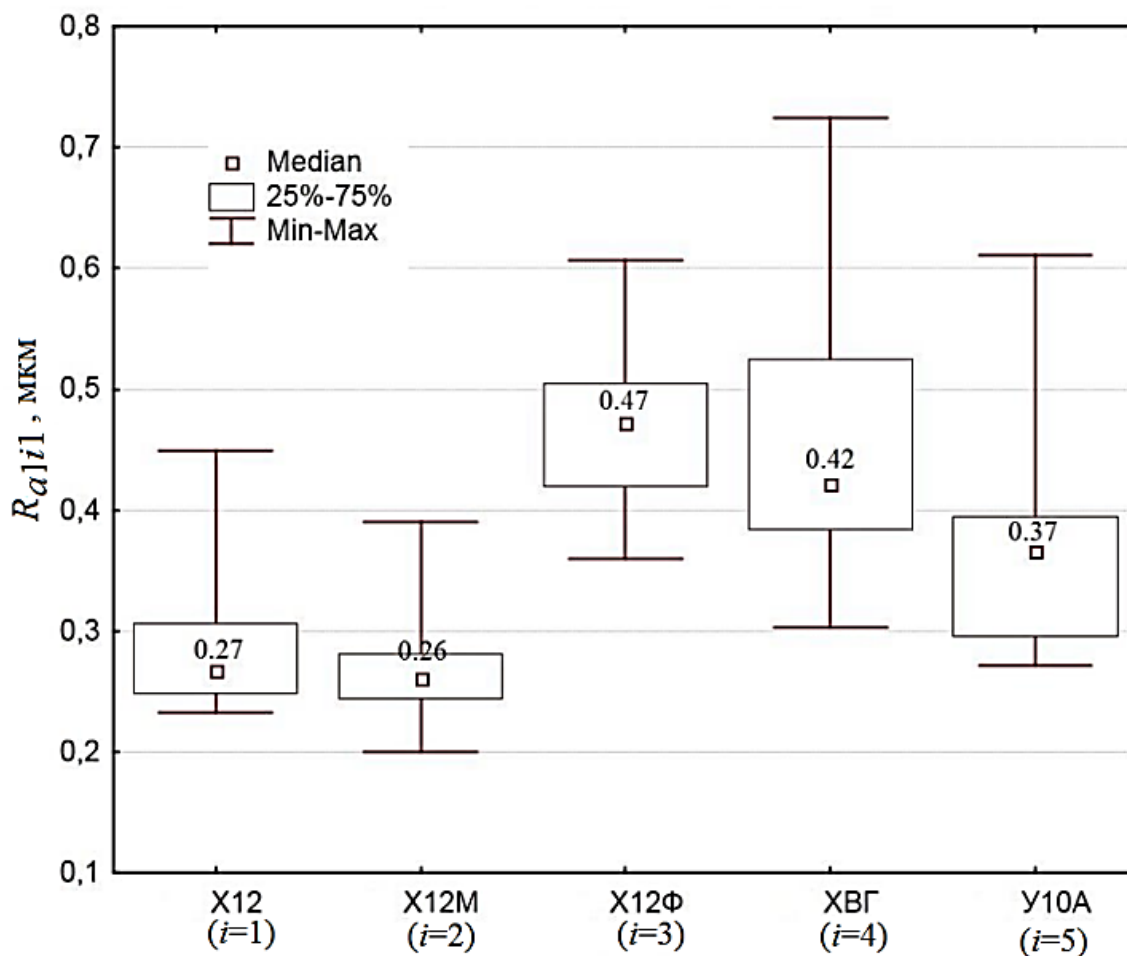


Рис. 2. Описательные непараметрические статистики для параметра R_{a1i1} при шлифовании с $t = 0,005$ мм

Fig. 2. Descriptive nonparametric statistics for the parameter R_{a1i1} when grinding at $t = 0.005$ mm

Прогнозируемые средние и медианы (см. рис. 2, табл. 1) шероховатостей позволили шлифуемые стали разбить на три группы в порядке роста опорных значений для параметров R_{a1} , R_{max1} , R_{z1} : 1 – X12, X12M, 2 – У10А, 3 – X12Ф, ХВГ. Рост микронеровностей составил в совокупности три КВ. Например, для параметра R_{a1} от КВ = 0,32 до КВ = 0,50 мкм и т.д. Из табл. 2 видно, что все ожидаемые средние шаги $\hat{m}S_{m2i}$, $i = 1, 5$ характеризуются одной КВ = 100 мкм, а $\hat{m}t_{50(1)} = 40,23\text{--}44,49\%$. Минимум $\hat{m}t_{50(1)}$ предсказан при шлифовании сталей X12, X12Ф, а максимум – для стали ХВГ. Известно, что увеличение параметров t_p обеспечивает рост долговечности и надеж-

ности машин [3].

Второй статистической характеристикой для (2) служит прецизионность: SD, R, КШ, причем последняя величина является приоритетной при использовании непараметрического метода. Как известно, изготовление штампов ведется в условиях единичного производства, в связи с чем прецизионность (2) играет меньшую роль по сравнению с опорными значениями микронеровностей.

Как видно из табл. 2, по КШ для всех анализируемых параметров шероховатости наибольшая стабильность процесса шлифования имеет место для стали X12M. Сюда же относится параметр R_{max1} для стали X12Ф.



Таблица 2

Влияние штамповых сталей на меры рассеяния шероховатостей
при шлифовании при $t = 0,005$ мм

Table 2

Influence of die steels on roughness scattering measures
when grinding at $t = 0.005$ mm

Пара- метр	Сталь, ($i = \overline{1;5}$)	SD^i , мкм	R^i , мкм	КШ _i , мкм	K_{cmdi1k}		
					$K = 1(12)$	$K = 2(13)$	$K = 3(14)$
R_{ai1}	X12(1)	0,05	0,22	0,06	1,00	1,00	1,00
	X12M(2)	0,04	0,19	0,04	1,27	1,14	1,60
	X12Ф(3)	0,06	0,25	0,08	0,84	0,88	0,71
	ХВГ(4)	0,10	0,42	0,14	0,52	0,52	0,41
	У10А(5)	0,08	0,34	0,09	0,60	0,64	0,62
R_{max1i1}	X12(1)	0,29	1,04	0,38	1,00	1,00	1,00
	X12M(2)	0,19	0,81	0,31	1,47	1,28	1,22
	X12Ф(3)	0,30	1,38	0,31	0,96	0,75	1,24
	ХВГ(4)	0,46	1,64	0,71	0,62	0,63	0,54
	У10А(5)	0,48	1,99	0,40	0,60	0,52	0,96
R_{z1i1}	X12(1)	0,13	0,52	0,18	1,00	1,00	1,00
	X12M(2)	0,10	0,39	0,13	1,32	1,33	1,36
	X12Ф(3)	0,14	0,63	0,14	0,93	0,83	1,29
	ХВГ(4)	0,19	0,74	0,25	0,69	0,70	0,71
	У10А(5)	0,27	1,03	0,26	0,49	0,51	0,68
S_{m2i1}	X12(1)	22,39	101,50	26,68	1,00	1,00	1,00
	X12M(2)	34,05	193,71	21,37	0,66	0,52	1,25
	X12Ф(3)	37,52	143,18	43,56	0,60	0,71	0,61
	ХВГ(4)	24,16	101,68	25,47	0,93	1,00	1,05
	У10А(5)	22,22	107,33	21,51	1,01	0,95	1,24
$t_{50(1i1)}$	X12(1)	8,44	29,90	12,62	1,00	1,00	1,00
	X12M(2)	7,47	30,03	7,77	1,13	1,00	1,62
	X12Ф(3)	8,59	36,57	10,11	0,98	0,82	1,25
	ХВГ(4)	7,88	29,72	10,90	1,07	1,01	1,16
	У10А(5)	11,06	35,11	17,72	0,76	0,85	0,71

На рис. 2 сказанное подтверждает минимум разностей $|y_{0,75} - y_{0,25}|_{121}$. Вторая позиция по стабильности шлифования сталей связана с анализируемыми параметрами шероховатости: для R_{ai} и R_{max1} наименьшая величина предсказана для сталей X12; для параметра R_{z1} эта позиция отдана стали X12Ф; для S_{m2} – У10А; для $t_{50(1)}$ – X12Ф. Наибольшие КШ имеют место при шлифовании сталей ХВГ и У10А. На качественном уровне аналогичные результаты предсказаны и по SD и R в условиях использования параметрического метода

статистики. Прецизионность процесса по КШ для среднего продольного шага следует классифицировать следующей возрастающей последовательностью: 21,37–21,51 мкм – X12М, У10А; 25,47–26,68 мкм – ХВГ, X12; 43,57 мкм – X12Ф. Для параметра $t_{50(1)}$ предсказана следующая возрастающая последовательность по сталям: X12М, X12Ф, ХВГ, X12, У10А. Близкие результаты показаны параметрическими оценками прецизионности по SD и R .

Удовлетворительное совпадение результатов по стабильности процесса шлифования при $t = 0,005$ мм, предсказан-

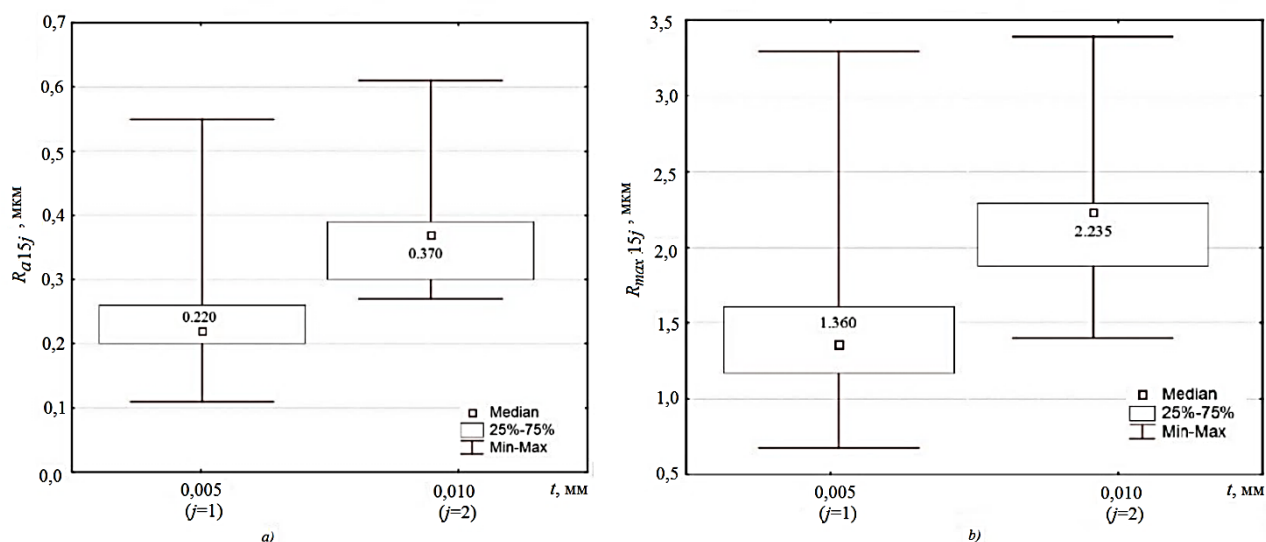


Рис. 3. Описательные непараметрические статистики для параметров R_{a1} (a) и R_{max1} (b) при шлифовании стали У10А при глубинах резания: $t_1 = 0,005$ мм и $t_2 = 0,01$ мм

Fig. 3. Descriptive nonparametric statistics for the parameters R_{a1} (a) and R_{max1} (b) at C10A steel grinding at the cutting depths of $t_1 = 0.005$ mm and $t_2 = 0.01$ mm

ное обеими методами статистики, обусловлено высокой степенью однородности дисперсии, что требуется в большей мере для гауссового распределения.

При переменной глубине резания $t \in [0,005, 0,01]$ мм возросла неоднородность дисперсий наблюдений (2), что исключило возможность привлечения параметрической статистики для их интерпретации. По этой причине воспользовались непараметрическим методом. В качестве предмета исследования была выбрана сталь У10А.

Как видно из рис. 3, варьирование t от 0,005 до 0,01 мм сопровождается увеличением опытных медиан на (2–3) КВ, что обусловлено ростом объема снимаемого металла за один двойной ход стола. При этом величина КШ ведет себя неоднозначно. В частности, для параметра R_{a1} возрос от 0,06 до 0,08 мкм. В то же время для R_{max1} сохранился на прежнем уровне: КШ = 0,4 мкм. Оценки стабильности процесса для параметрической статистики показали противоположные результаты: SD и R снизились соответственно: от 0,12 до 0,08 мм; 0,44 до 0,34 мм для параметра R_{a1} и от 0,67 до 0,48; 2,61 до 1,99 мм для параметра R_{max1} . Наиболее вероятно, что

различие оценок по стабильности процесса связано с отмеченным ранее нарушением однородности дисперсий для (2), что недопустимо при использовании параметрического метода статистики.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Перед статистической обработкой наблюдения требуют тщательного тестирования на предмет нормальности распределений и особенно однородности дисперсий.

2. Установлено, что медианы $\tilde{y}_i$, $i = \overline{1,5}$ высотных параметров и средних шагов оказались меньше средних y_i или (реже) равны им. Сказанное открывает дополнительные резервы для повышения производительности при шлифовании деталей штампов.

3. По мерам положения прогнозируемые высотные параметры шероховатости следует разбить на три группы с возрастанием их величин: 1 – стали Х12, Х12М; 2 – У10А; 3 – Х12Ф, ХВГ. Их рост при идентичных условиях шлифования составил три КВ. Сказанное следует учитывать при выборе марки стали для деталей штампа.

4. Наибольшая стабильность шли-



фования предсказана для деталей из стали Х12М. Однако с учетом единичного производства штампов эта характеристика

наблюдений является менее значимой по сравнению с опорными значениями.

Библиографический список

1. Дальский А.М., Васильев А.С., Клименко С.А., Полонский Л.Г., Хейфец М.Л. Технологические основы управления качеством машин. М.: Машиностроение, 2003. 255 с.
2. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
3. Сулов А.Г. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
4. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / пер. с англ. М.: Мир, 1981. 520 с.
6. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем. М.: Статистика, 1976. 598 с.
7. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Подходы к оценке опорной части поверхности шлифованных плоскостей титановых деталей абразивными кругами Norton // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 5 (307). С. 142–150.
8. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2007. 424 с.
9. Кремень З.И., Юрьев В.Г. Шлифование суперабразивами высокопластичных сплавов. СПб.: Изд-

- во Политехнического университета, 2013. 166 с.
10. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
11. Солер Я.И., Шустов А.И. Пути улучшения микрогеометрии быстрорежущих пластин при шлифовании высокопористыми нитридоборовыми кругами // Научное обозрение. 2014. № 8-1. С. 94–101.
12. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
13. Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И. Штамповые стали. М.: Металлургия, 1980. 224 с.
14. Солер Я.И., Прокопьева А.В. Исследование влияния выхаживания на микрорельеф пластин Р9М4К8 при шлифовании кругами из кубического нитрида бора // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2009. № 1 (42). С. 24–27.
15. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Выбор абразивных кругов при плоском шлифовании деталей силового набора летательных аппаратов по критерию шероховатости // Вестник машиностроения. 2010. № 3. С. 55–64.
16. Дрейпер Н.Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн. Кн. 1. / пер. с англ. М.: Диалектика, 2007. 912 с.

References

1. Dal'skij A.M., Vasil'ev A.S., Klimenko S.A., Polonskij L.G., Hejfec M.L. *Tekhnologicheskie osnovy upravleniya kachestvom mashin* [Technological bases for machine quality management]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003, 255 p. (In Russ.).
2. Demkin N.B., Ryzhov E.V. *Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin* [Surface quality and contact of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981, 244 p. (In Russ.).
3. Suslov A.G. *Inzheneriya poverhnosti detalej* [Part surface engineering]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 2008, 320 p. (In Russ.).
4. Suslov A.G. *Kachestvo poverhnostnogo sloya detalej mashin* [Quality of machine part surface layer]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2000, 320 p. (In Russ.).
5. Dzhonson N., Lion F. Statistics and experiment planning in engineering and science. Data processing methods, 1981. 520 p. (Russ. ed.: *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody obrabotki dannyh*. Moscow, Mir Publ., 1981, 520 p.).
6. Zaks L. Sachs L. Statistical evaluation, 1976, 598 p. (Russ. ed.: *Statisticheskoe ocenivanie*. Moscow, Statistika Publ., 1976, 598 p.).
7. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Principles for the estimation of a bearing area of polished planes of titanium

- parts by abrasive wheels Norton. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technologies], 2014, no. 5 (307), pp. 142–150. (In Russ.).
8. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. Saint Petersburg: Politehnika Publ., 2007, 424 p. (In Russ.).
9. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G. *Shlifovanie superabrazivami vysokoplastichnyh splavov* [Superabrasive grinding of highly plastic alloys]. Saint Petersburg: Politehnika Publ., 2013, 166 p. (In Russ.).
10. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [High porosity wheel grinding]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2007, 688 p. (In Russ.).
11. Soler Ya.I., Shustov A.I. Ways of improving the micro-geometry of high-speed plates during polishing with highly porous boron nitride circles. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2014, no. 8–1, pp. 94–101. (In Russ.).
12. Geller Yu.A. *Instrumental'nye stali* [Tool steels]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1983, 527 p. (In Russ.).
13. Poznyak L.A., Skrynchenko Yu.M., Tishaev S.I. *Shtampovye stali* [Die steels]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1980, 224 p. (In Russ.).

14. Soler Ya.I., Prokop'eva A.V. The research of sparking-out effect on the roughness at the plate flat for the flat CBN-grinding of the steel brand P9M4K8. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science (Technology, Equipment, Tools)], 2009, no. 1 (42), pp. 24–27. (In Russ.).

15. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Selection of abrasive

wheels at flat grinding of aircraft framework parts by the roughness criterion. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2010, no. 3, pp. 55–64. (In Russ.).

16. Drejper N.R., Smit G. Applied regression analysis, 2007, 912 p. (Russ. ed.: *Prikladnoj regressionnyj analiz*. Moscow, Dialektika Publ., 2007, 912 p.).

Критерии авторства

Солер Я.И., Дроzhzhин С.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Солер Яков Иосифович,

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

Дроzhzhин Сергей Николаевич,

старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: drozhzhin_sn@mail.ru

Authorship criteria

Soler Ya.I., Drozhzhin S.N. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakov I. Soler,

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

Sergei N. Drozhzhin,

Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: drozhzhin_sn@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.95.025.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-743-750>

Механообработка композиционного материала с использованием робототехнического комплекса на базе робота KUKA KR210

© А.А. Стуров, Н.С. Чашин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данной работы заключается в повышении качества поверхности и точности отверстий и кромок при механообработке композиционного материала, армированного углеволокном, путем оптимизации режимов резания. В качестве основного обрабатывающего оборудования выбран робототехнический комплекс на основе промышленного робота KUKA KR210 R2700 EXTRA. Объектом исследования является пластина из углепластика марки IMS 24K/PRISM EP 2400RS толщиной 16 мм. Для операции сверления выбрано сверло CoroDrill 856-1-0635-05-A0 диаметром 6,35 мм производства компании Sandvik Coromant. Данный инструмент представляет собой цельное твердосплавное сверло с алмазным покрытием N20C и позиционируется как инструмент для сверления отверстий высокого качества в композиционных материалах. Операция фрезерования осуществлялась с помощью фрезы 67-084 1/4 SC FGR (Aramid) производства компании Onsrud. Инструмент является цельной твердосплавной фрезой без покрытия и позиционируется как инструмент для обработки композиционных материалов. Испытания заключались в определении режимов резания, обеспечивающих максимальную производительность, а также режимов для максимального качества поверхности и точности отверстий и кромок. В рамках испытаний была выбрана область значений режимов резания, включающая режимы, рекомендованные производителем инструмента. По окончании работ измерены шероховатости отверстий и кромок с помощью контактного профилометра Taylor Hobson Form Talysurf i200. Контроль диаметров отверстий производился с помощью координатно-измерительной машины Carl Zeiss CONTURA G2. Выявлены зависимости параметров получаемых шероховатостей от режимов обработки. Построены графики, отражающие изменения шероховатостей и диаметров от режимов резания. А также графики влияния режимов резания на шероховатость поверхности кромок. Даны рекомендации по применению технологий механообработки композиционного материала на промышленном роботе.

Ключевые слова: сверление, фрезерование, углепластик, полимерный композиционный материал, промышленный робот, автоматизация, авиационная техника

Информация о статье: Дата поступления 20 мая 2019 г.; дата принятия к печати 28 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Стуров А.А., Чашин Н.С. Механообработка композиционного материала с использованием робототехнического комплекса на базе робота KUKA KR210. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):743–750. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-743-750

Machining composite material by a robotic complex based on KUKA KR210 robot

Anton A. Sturov, Nikolai S. Chashchin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of this work is to improve the quality of surface and accuracy of holes and edges at machining of carbon fiber reinforced composite material by cutting conditions optimization. The robotic complex based on the KUKA KR210 R2700 EXTRA industrial robot was chosen as the main processing equipment. The object of the study is a carbon fiber plate of IMS 24K / PRISM EP 2400RS brand with the thickness of 16 mm. Drilling was performed with a CoroDrill 856-1-0635-05-A0 drill bit made by Sandvik Coromant with the diameter of 6.35 mm. This tool is a solid carbide drill with N20C diamond coating used for drilling high quality holes in composite materials. The milling operation was carried out using a 67-084 1/4 SC FGR milling cutter (Aramid) manufactured by Onsrud. The tool is a coating-free solid carbide cutter used for processing composite materials. The tests included the determination of cutting modes ensuring maximum performance, and the modes for maximum surface quality and accuracy of holes and edges. As part of the tests, the range of values of cutting conditions was chosen. It included the modes recommended by the tool manufacturer. At the end of the works, the roughness of holes and edges was measured using a Taylor Hobson Form Talysurf i200 contact profilometer. Hole diameters were controlled using the Carl Zeiss CONTURA G2 coordinate measuring machine.

The dependences of the parameters of obtained roughness on the processing modes have been revealed. The graphs reflecting the variations of roughness and diameters depending on the cutting modes have been plotted as well as the graphs of cutting condition influence on edge surface roughness. Recommendations have been given on the application of composite material machining technologies on an industrial robot.

Keywords: drilling, milling, carbon fiber, polymer composite material, industrial robot, automation, aviation equipment

Information about the article: Received May 20, 2019; accepted for publication June 28, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Sturov A.A., Chashchin N.S. Machining composite material by a robotic complex based on KUKA KR210 robot. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):743–750. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-743-750

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время доля распространения композиционных материалов в авиационной промышленности неуклонно растет, следовательно, увеличиваются требования к качеству и производительности механообработки таких материалов.

В сфере обработки крупногабаритных деталей активно внедряются промышленные робототехнические комплексы (РТК) [1–14]. Они позволяют заменить человеческий труд в опасных средах или при работе с опасными для здоровья человека материалами, а также значительно увеличить производительность в сравнении с ручной обработкой.

Одними из часто применяемых видов механообработки на РТК является формирование отверстий и фрезерование

кромки [2–5]. Таким образом, целью работы является отработка технологии механообработки композиционного материала на промышленном роботе с использованием в качестве режущего инструмента сверла производства компании Sandvik Coromant и фрезы производства компании ONSRUD.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной задачей данного экспериментального исследования было определение применимости технологии фрезерования и сверления отверстий на промышленном роботе для получения качественных поверхностей и высокоточных отверстий [6–9]. Для этой цели проводились испытания, направленные на выявление зависимостей качества получаемых поверхностей от режимов резания.

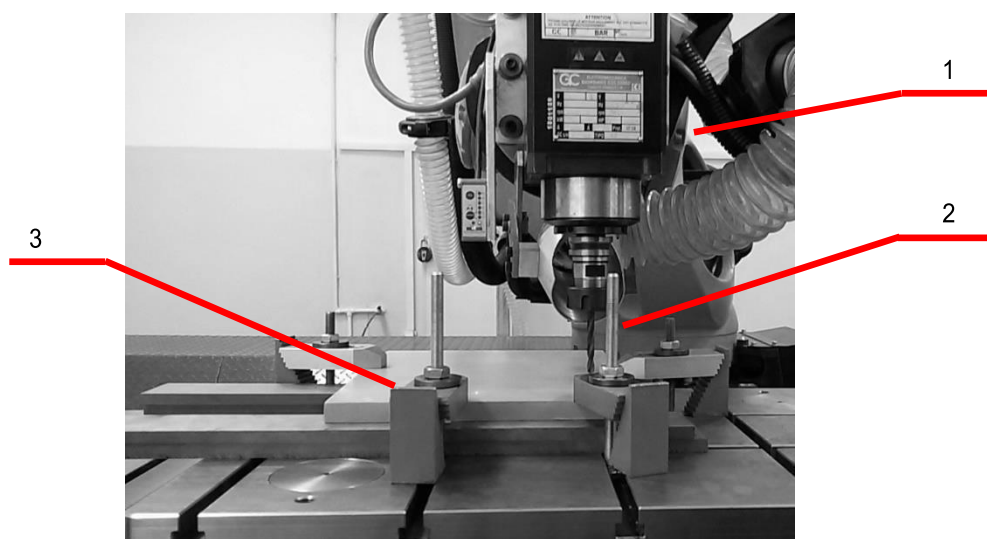


Рис. 1. Схема проведения испытаний: 1 – промышленный робот Kuka;
2 – режущий инструмент; 3 – композит
Fig. 1. Test scheme: 1 – KUKA industrial robot; 2 – cutting tool; 3 – composite



Таблица 1

Технические характеристики KUKA KR 210 R2700 extra

Table 1

Specifications of KUKA KR 210 R2700 extra

Характеристики	Единица измерения	Значение
Допустимая нагрузка	кг	210
Макс. радиус действия	мм	2700
Точность повторения ISO 9283	мм	$\pm 0,06$
Масса манипулятора	кг	1068

Стенд для отработки технологии представляет собой (рис. 1) три составляющих.

1. Промышленный робот KUKA серии QUANTEC KR 210 R2700 extra. Робот имеет 6 степеней свободы и оснащен электрическим шпинделем, который осуществляет только вращение инструмента. Дополнительно робот оснащен силомоментным датчиком, который прерывает работу при достижении критических нагрузок.

Основные технические характеристики робота указаны в табл. 1.

2. Сверло CoroDrill 856-1-0635-05-A0 (рис. 2) производства компании Sandvik Coromant. Представляет собой цельное твердосплавное сверло с алмазным покрытием N20C [6] и позиционируется как инструмент для сверления отверстий высокого качества в композиционных материалах.

Основные параметры инструмента указаны в табл. 2.

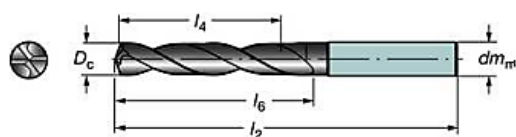


Рис. 2. Схема инструмента

Fig. 2. Tool Scheme

Таблица 2

Параметры инструмента

Table 2

Tool parameters

Параметры инструмента	Размер, мм
D_c	6,35
dm_m	8
l_2	91
l_4	39
l_6	53

Рекомендуемые производителем режимы резания для инструмента:

- 1) V_c – 130 м/мин;
- 2) F_n – 0,05 мм/об.

Для исследования сделана выборка из 15 блоков, для каждого блока была выбрана одна скорость и 3 подачи.

Основные параметры испытаний по сверлению указаны в табл. 3.

Таблица 3

Параметры сверления

Table 3

Drilling parameters

№	V , м/мин	n , об/мин	F_n , мм/об	$F_{мин}$, мм/с
1	190	9500	0,06	0,0095
2	190	9500	0,05	0,008
3	190	9500	0,04	0,0063
4	160	8000	0,06	0,008
5	160	8000	0,05	0,0066
6	160	8000	0,04	0,0053
7	130	6500	0,06	0,0065
8	130	6500	0,05	0,0054
9	130	6500	0,04	0,0043
10	100	5000	0,06	0,005
11	100	5000	0,05	0,004
12	100	5000	0,04	0,0033
13	70	3500	0,06	0,0035
14	70	3500	0,05	0,003
15	70	3500	0,04	0,0023

Фреза 67-084 1/4 SC FGR (ARAMID) (рис. 3) производства компании ONSRUD. Представляет собой цельную твердосплавную фрезу без покрытия и позиционируется как инструмент для обработки

композиционных материалов.

Основные параметры инструмента указаны в табл. 4.



Рис. 3. Фреза 67-084 1/4
 Fig. 3. Milling cutter 67-084 1/4

Таблица 4
 Параметры инструмента
 Table 4
 Tool parameters

Параметры инструмента	Размер, мм
Диаметр хвостовика (d)	6,35
Диаметр режущей кромки (D)	6,35
Общая длина (L)	63,5
Длина режущей кромки	19

Рекомендуемые производителем режимы резания для инструмента:

- 1) V_c – 10000 об/мин;
- 2) f_z – черновая 0,03–0,08 мм/зуб;
 чистовая 0,02–0,04 мм/зуб.

Основные параметры испытаний по сверлению указаны в табл. 5.

Таблица 5
 Параметры сверления
 Table 5
 Drilling parameters

№	V , м/мин	S , мм/мин
1	150	640
2	170	720
3	190	800
4	150	1024
5	170	1152
6	190	1280

3. Объект исследования – пластина, выполненная из композиционного материала (углепластика марки IMS 24K/PRISM EP 2400RS), толщиной 16 мм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка отверстий на робототехнических комплексах и точность отверстий. Точность получаемых диаметров в отверстиях является одним из основных параметров в авиастроении, характеризующих качество отверстий. Контроль диаметров осуществлялся с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) Carl Zeiss CONTURA G2.

График, отражающий изменение диаметров отверстий в зависимости от использованных режимов резания, показан на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что режимами резания, обеспечивающими максимальную производительность, являются скорость резания 130 м/мин и подача 0,06 мм/об. Максимальное качество отверстия соответствует скорости резания 70 м/мин и подача 0,06 мм/об.

Не все использованные режимы способствуют формированию диаметров отверстий в пределах качества точности IT9 (допуск 36 мкм) от заявленного производителем диаметра инструмента 6,35 мм. При использовании режимов обработки на скорости 130 м/мин получаемые диаметры находятся в допуске IT9, но приближаются к его верхней границе, что является достаточно высоким показателем, т.к. сам промышленный робот имеет погрешность позиционирования ± 60 мкм. Это объясняется тем, что в процессе резания сверло самоцентрируется в обработанном отверстии, поэтому воздействие погрешности звеньев робота уменьшается с увеличением глубины резания.

Шероховатость отверстий.

Шероховатость получаемых отверстий также является одним из основных параметров в авиастроении, характеризующих качество отверстий. Контроль шероховатости осуществлялся с помощью профилометра Taylor Hobson Form Talysurf i200.

График, отражающий изменение шероховатости отверстий в зависимости от использованных режимов резания, показан на рис. 5.

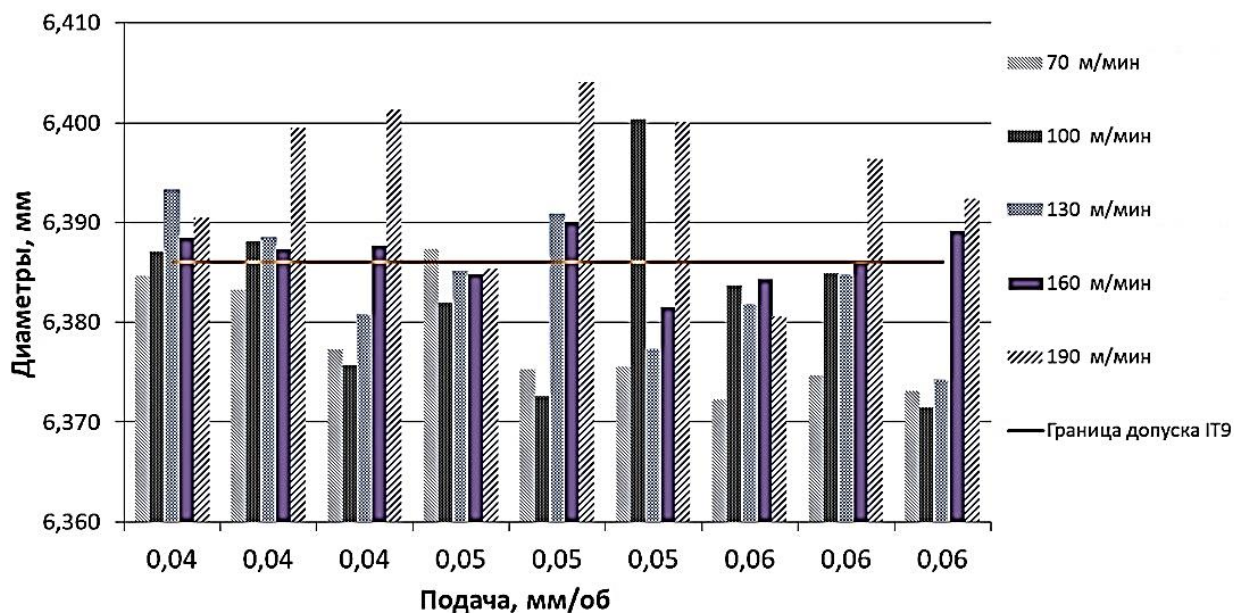


Рис. 4. График зависимости получаемых диаметров отверстий от режимов резания
Fig. 4. Diagram of obtained hole diameter dependence on cutting conditions

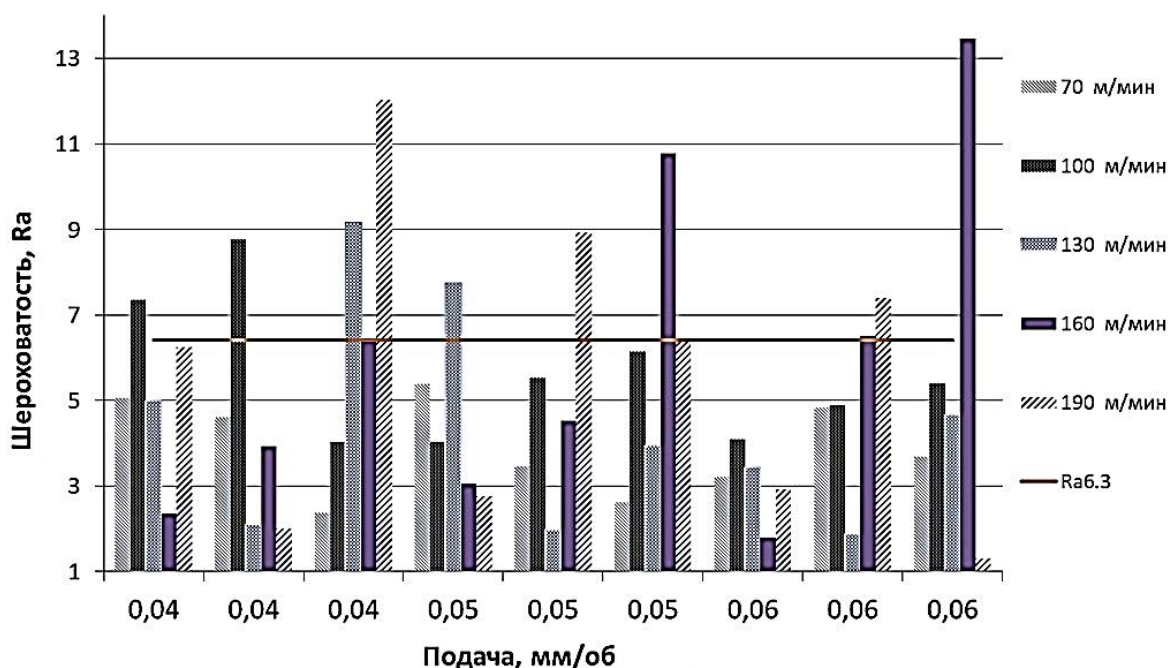


Рис. 5. График шероховатости отверстий
Fig. 5. Diagram of hole roughness

Из графиков видно, что режимами резания, обеспечивающими максимальную производительность, являются скорость резания 130 м/мин, подача 0,06 мм/об. Максимальное качество соответствует скорости резания 70 м/мин, подаче 0,06 мм/об.

Фрезерование кромок на робототехнических комплексах. Шероховатость поверхности. Актуальность контроля шероховатости при фрезеровании полимерных композиционных материалов (ПКМ) обусловлена ограничениями,

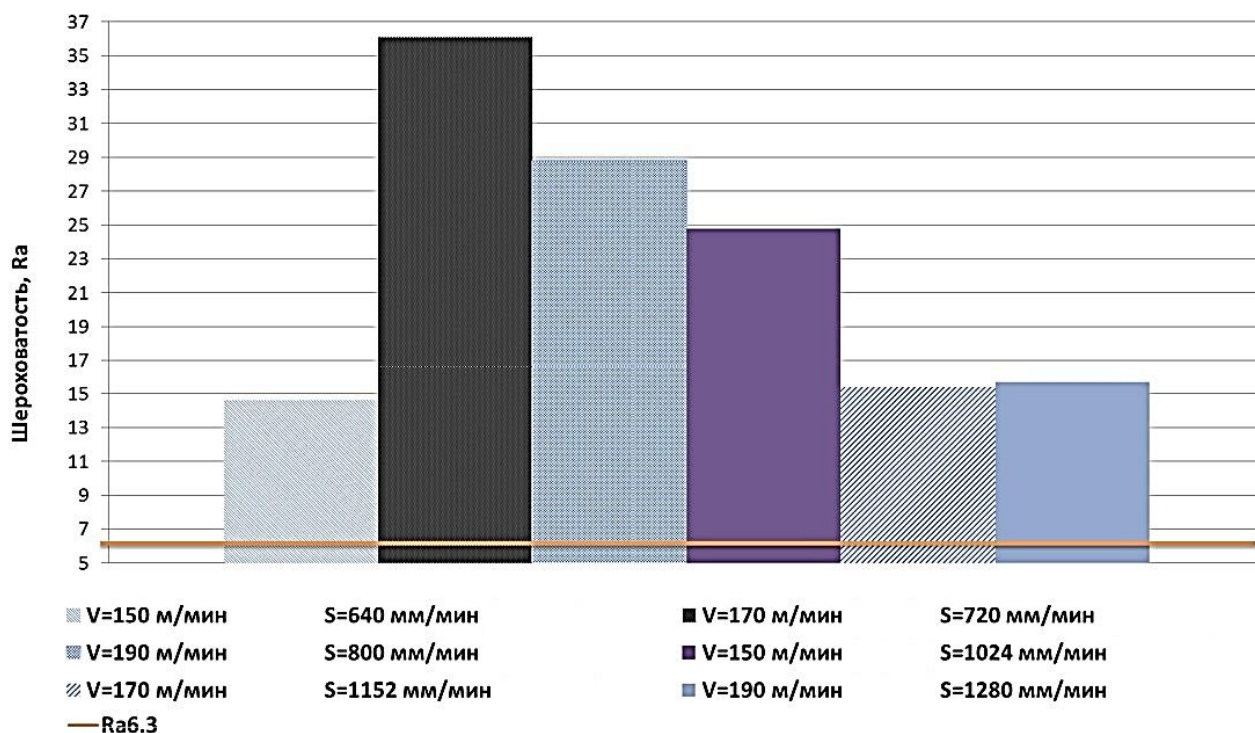


Рис. 6. График шероховатости поверхности
 Fig. 6. Diagram of surface roughness

накладываемыми самим материалом. Композит представляет собой многослойный материал, поэтому при фрезеровании возможно образование множества недорезанных ворсинок, а впоследствии получается плохое качество поверхности, поэтому специально для обработки композитов разрабатывают инструмент со специальной геометрией.

График, отражающий изменение шероховатости обработанной поверхности в зависимости от использованных режимов резания, показан на рис. 6.

По результатам измерений видно,

что фрезерование композита на всех режимах выходит за допуск шероховатости Ra6.3.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология обработки отверстий на робототехнических комплексах позволяет получать отверстия требуемой точности диаметров и качества по шероховатости.

Обработка кромок с использованием фрезы 67-084 1/4 SC FGR (ARAMID) не позволяет получить требуемые параметры шероховатости на исследуемых режимах.

Библиографический список

1. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. Исследование частотных характеристик робота KUKA KR210 R2700 Extra // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 11 ноября 2016 г.). Иркутск, 2016. С. 252–257.
2. Сидорова А.В. Исследование обработки ПКМ на РТК, дефект отклонения от круглости // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 11 ноября 2016 г.). Иркутск, 2016. С. 258–262.
3. Иванова А.В., Пономарев Б.Б. Исследование точ-

- ности воспроизведения пространственных контуров промышленными роботами // Наука и образование. 2014. № 5. С. 5–11.
4. Чапышев А.П., Иванова А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1-5. С. 1627–1634.
5. Чашчин Н.С., Иванов Ю.Н. Обработка отверстий в смешанных пакетах методом орбитального сверления // Вестник Иркутского государственного техни-



ческого университета. 2015. № 11 (106). С. 44–49.

6. Чашин Н.С., Оценка точности обработки отверстий в углепластике на промышленном роботе KUKA KR210 R2700 Extra // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 11 ноября 2016 г.). Иркутск, 2016. С. 308–313.

7. Dudarev A. The Problem Sensitization Robotic Complex Drilling and Milling of Sandwich Shells of Polymer Composites // 4th International Conference on Applied Innovation in IT. (Koethen, 10 March 2016). Koethen, 2016. С. 15–19.

8. Kishore K.P., Kuppan P., Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: a review // Journal of Materials Research and Technology. 2018. Vol. 7. Issue 2. P. 180–189.

9. Qiang Fang, Ze-Min Pan, Bing Han, Shao-Hua Fei, Guan-Hua Xu, Ying-Lin Ke. A Force Sensorless Method for CFRP/Ti Stack Interface Detection during Robotic Orbital Drilling Operations // Mathematical Problems in Engineering. 2015. P. 11–26.

10. Чапышев А.П., Иванова А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техни-

ки: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: статьи и тезисы докладов IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. (г. Ульяновск, 16–17 октября 2014 г.). Ульяновск, 2014. С. 347–348.

11. Иванова А.В., Пономарев Б.Б. Исследование точности воспроизведения пространственных контуров промышленными роботами // Наука и образование. 2014. № 5. С. 1–11.

12. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-2. С. 533–537.

13. Бакшеева Е.Н., Беломестных А.С. Исследование шероховатости деталей после обработки на робототехническом комплексе // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей IX Всерос. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 12–15 апреля 2017 г.). Иркутск, 2017. С. 124–128.

14. Semyonov E.N., Sidorova A.V., Pashkov A.E., Belomestnykh A.S., Accuracy Assessment of Kuka KR210 R2700 Extra Industrial Robot // International Journal of Engineering & Technology. 2016. Vol. 16. No. 1. P. 19–25.

References

1. Semenov E.N., Belomestnykh A.S., Sidorova A.V. *Issledovanie chastotnykh kharakteristik robota KUKA KR210 R2700 Extra* [Research of robot KUKA KR210 R2700 Extra frequency characteristics]. *Sbornik statey vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri"* [Collected works of All-Russian youth scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia", Irkutsk, 11 November 2016]. Irkutsk, 2016, pp. 252–257. (In Russ.).

2. Sidorova A.V. *Issledovanie obrabotki PKM na RTK, defekt otkloneniya ot kruglosti* [Study of polymer composite materials processing at the Robotics complex, a defect of deviation from roundness]. *Sbornik statey vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri"* [Collected works of All-Russian youth scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia", Irkutsk, 11 November 2016]. Irkutsk, 2016, pp. 258–262. (In Russ.).

3. Ivanova A.V., Ponomarev B.B. Study fidelity spatial contours of industrial robots. *Nauka i obrazovaniye* [Science and Education], 2014, no. 5, pp. 5–11. (In Russ.).

4. Chapyshev A.P., Ivanova A.V. Technological capabilities of processes of mechanized finishing processing of parts using automatic stationary units. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2014, vol. 16, no. 1-5, pp. 1627–1634. (In Russ.).

5. Chashin N.S., Ivanov Yu.N. Orbital drilling of holes in

mixed packages. *Vestnik irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 11 (106), pp. 44–49. (In Russ.).

6. Chashin N.S. *Otsenka tochnosti obrabotki otverstiy v ugleplastike na promyshlennom robote KUKA KR210 R2700 Extra* [Evaluating hole machining accuracy in carbon plastic by the industrial robot KUKA KR210 R2700 Extra]. *Sbornik statey vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri"* [Collected works of All-Russian youth scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia", Irkutsk, 11 November 2016]. Irkutsk, 2016, 308–313. (In Russ.).

7. Dudarev A., The Problem Sensitization Robotic Complex Drilling and Milling of Sandwich Shells of Polymer Composites // 4th International Conference on Applied Innovation in IT (Koethen, 10 March 2016). Koethen, 2016, pp. 15–19.

8. Kishore K.P., Kuppan P., Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: a review // Journal of Materials Research and Technology, 2018, vol. 7, issue 2, pp. 180–189.

9. Qiang Fang, Ze-Min Pan, Bing Han, Shao-Hua Fei, Guan-Hua Xu, Ying-Lin Ke. A Force Sensorless Method for CFRP/Ti Stack Interface Detection during Robotic Orbital Drilling Operations // Mathematical Problems in Engineering, 2015, pp. 11–26.

10. Chapyshev A.P., Ivanova A.V. *Tekhnologicheskie vozmozhnosti processov mekhanizirovannoy finishnoy obrabotki detalej s primeneniem avtomaticheskikh*

stacionarnykh ustanovok [Technological capabilities of mechanized finishing of parts using automatic stationary units]. *Stat'i i tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. 2014. "Sistemy upravleniya zhiznennym ciklom izdelij aviacionnoj tekhniki: aktual'nye problemy, issledovaniya, opyt vnedreniya i perspektivy razvitiya"* [Articles and abstracts of IV International scientific and practical conference "Life Cycle Management Systems for Aviation Engineering Products: Actual Problems, Research, Implementation Experience and Development Prospects", Ulyanovsk, 16–17 October 2014]. Ulyanovsk, 2014, pp. 347–348. (In Russ.).

11. Ivanova A.V., Ponomarev B.B. Study fidelity spatial contours of industrial robots. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2014, no. 5, pp. 1–11. (In Russ.).
12. Chapyshev A.P., Ivanova A.V., Kryuchkin A.V. Technological capabilities of the processes of mechanized finishing of parts. *Izvestiya Samarskogo nauch-*

nogo centra Rossijskoj akademii nauk [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6-2, pp. 533–537. (In Russ.).
13. Baksheeva E.N., Belomestnykh A.S. *Issledovanie sheroховatosti detalej posle obrabotki na robototekhnicheskoy komplekse* [Study of part roughness after processing on a robotic complex]. *Sbornik statej IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collected works of IX All-Russian scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia", Irkutsk, 12–15 April 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 124–128. (In Russ.).

14. Semyonov E.N., Sidorova A.V., Pashkov A.E., Belomestnykh A.S., Accuracy Assessment of Kuka KR210 R2700 Extra Industrial Robot // *International Journal of Engineering & Technology*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 19–25.

Критерии авторства

Стуров А.А., Чашчин Н.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Стуров Антон Андреевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: hero124@yandex.ru

Чашчин Николай Сергеевич,
аспирант,
младший научный сотрудник кафедры технологии
и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: rufle54007@mail.ru

Authorship criteria

Sturov A.A., Chashchin N.S. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton A. Sturov,
Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: hero124@yandex.ru

Nikolai S. Chashchin,
Postgraduate student,
Junior Researcher of Department of Mechanical
Engineering Production Technologies and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: rufle54007@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 620.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-751-763>

Научно-методическое обеспечение оптимального развития теплоснабжения и его практическая реализация на территории Иркутской области

© В.А. Стенников, А.В. Пеньковский, И.В. Постников, О.А. Еделева,
Е.Е. Медникова, Т.В. Добровольская, П.А. Соколов

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

Резюме: Цель – комплексное преобразование теплоснабжающих систем с целью повышения их надежности, управляемости, экономичности и создания комфортных условий для потребителей; формирование методических принципов построения новых современных теплоснабжающих систем и разработка актуального вычислительного инструментария по оптимальному планированию развития и функционирования теплоснабжающих систем. Использована методология многоуровневого структурирования и декомпозиции, современных методов математического моделирования и оптимизации, модели и методы теории гидравлических цепей и теории управления. Определены перспективные направления развития централизованного и децентрализованного теплоснабжения, рассмотрены энергоэффективные технологии производства энергии на базе когенерации, апробированы рекомендации по объемам и срокам реконструкции действующих и планируемых в перспективе теплоэнергетических объектов по годам на период до 2023 г., а также проанализированы механизмы формирования стабильных и благоприятных условий привлечения инвестиций. Получена комплексная оценка ситуации с теплоснабжением в регионе, отражающая особенности и проблемы текущего состояния, которое позволило определить рациональные пути их устранения.

Ключевые слова: научно-методическое обеспечение, теплоснабжающая система, производство и потребление тепловой энергии, источники тепла, прогноз теплопотребления, модернизация

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-48-380010 p_a)

Информация о статье: Дата поступления 09 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 05 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Стенников В.А., Пеньковский А.В., Постников И.В., Еделева О.А., Медникова Е.Е., Добровольская Т.В., Соколов П.А. Научно-методическое обеспечение оптимального развития теплоснабжения и его практическая реализация на территории Иркутской области. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):751–763. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-751-763

Scientific and methodological support of heat supply optimal development and its practical implementation in the Irkutsk region

Valeriy A. Stennikov, Andrei V. Penkovskiy, Ivan V. Postnikov, Olga A. Edeleva,
Ekaterina E. Mednikova, Tatiana V. Dobrovolskaya, Pavel A. Sokolov

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is an integrated transformation of heat supply systems in order to improve their reliability, manageability, efficiency and create comfortable conditions for consumers as well as formation of methodological principles of new modern heat supply systems construction and development of relevant computing tools for optimal planning of heat supply system development and operation. The study employs the methodology of multilevel structuring and decomposition, modern methods of mathematical modeling and optimization, models and methods of the theory of hydraulic circuits and control theory. The promising development directions of centralized and decentralized heat supply are identified. Energy efficient technologies of energy production based on cogeneration are considered. Recommendations on the reconstruction volumes and terms of currently operating and planned for the future heat power facilities arranged by the years for the period until 2023 are approved. Formation mechanisms of stable and favorable conditions of

investment attraction are analyzed. We have obtained a comprehensive assessment of the situation with heat supply in the region that reflects the features and problems of the current state, which allowed to outline the rational ways of their elimination.

Keywords: scientific and methodological support, heat supply system, production and consumption of thermal energy, heat sources, forecast of heat consumption, modernization

Acknowledgements: Researches are executed with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 17-48-380010 p_a)

Information about the article: Received April 09, 2019; accepted for publication June 05, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Stennikov V.A., Penkovskiy A.V., Postnikov I.V., Edeleva O.A., Mednikova E.E., Dobrovolskaya T.V., Sokolov P.A. Scientific and methodological support of heat supply optimal development and its practical implementation in the Irkutsk region. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):751–763. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-751-763

1. ВВЕДЕНИЕ

Теплоснабжение в России имеет большую социальную, экономическую, энергетическую и экологическую значимость. На долю Российской Федерации приходится около 44% мирового централизованного производства тепловой энергии. Именно здесь сосредоточен наибольший потенциал энергосбережения (94–110 млн т у. т.). Реализация этого потенциала обуславливает необходимость решения двух взаимосвязанных проблем системного характера. Первая из них состоит в переходе на новый уровень технологий и оборудования и предполагает комплексное преобразование теплоснабжающих систем (ТСС) с целью повышения их надежности, управляемости, экономичности создания комфортных условий у потребителей. Этому способствует сформировавшийся и продолжающий развиваться рынок современного энергоэффективного оборудования и технологий как отечественного, так и зарубежного производства, а также появление сервисной инфраструктуры, обеспечивающей обслуживание инновационного уровня энергоустановок [1, 2]. Вторая задача заключается в формировании методических принципов построения новых современных ТСС и разработке инновационного вычислительного инструментария по оптимальному планированию развития и функционирования [2–4]. Внедрение новых энергоэффективных технологий должно осуществляться по результатам их обоснования в соответствии с методологией опти-

мального проектирования ТСС [5], учитывающей их существующее состояние и актуальные требования по эффективности, надежности и экологичности [6, 7]. Применение адекватных современным требованиям научно-методического и вычислительного инструментария для принятия решений по построению сегодняшних ТСС позволит организовать процесс их инновационного преобразования максимально реализующим преимущества теплофикации (когенерации) и обеспечивающим оптимальное сочетание централизованного и децентрализованного теплоснабжения с интеграцией распределенной генерации энергии.

В период интенсивного развития централизованного теплоснабжения в СССР в 1960–1970 годы сформировалась комплексная методология обоснования решений по развитию теплоснабжения на различных уровнях территориальной и временной иерархии [8]. Эта методология базировалась на упрощенных принципах построения систем и централизованном планировании инвестиций.

Либерализация экономики России в 1990-е годы существенно изменила условия развития теплоснабжения и обоснования соответствующих решений. Радикально претерпели диверсификацию имущественные отношения, форма собственности, инвестиционные процессы, иной стала роль государства, централизованное управление развитием теплоснабжения сменилось на опосредованное регулирование, это произошло при влиянии экономи-



ческих и правовых механизмов, которые оказали значительное воздействие на эволюцию страны в целом.

В приведенных условиях важной задачей становится разработка государственных энергетических стратегий и программ, включающих желаемые с точки зрения общегосударственных приоритетов направления развития топливно-энергетического комплекса и механизмы их реализации, согласующие интересы многих субъектов отношений на разных уровнях: федеральных и региональных органов власти, энергокомпаний, потребителей, инвесторов, общественных движений и др.

Опыт работы по обоснованию направлений развития теплоснабжения различных территориальных образований выявил целесообразность формирования многоуровневой схемы его планирования и создание соответствующего методического аппарата. В этой иерархии первичным является уровень города, населенного пункта¹ [9]. Информация, получаемая по результатам оптимизации городских систем, передается на региональный уровень и затем интегрируется на уровне страны (восходящее планирование). В итерационном процессе она передается с верхнего на нижний уровень (нисходящее планирование). Методика, с одной стороны, учитывает особенности конкретных теплоснабжающих систем, а с другой – обеспечивает проведение единой государственной (федеральной, региональной) политики в области теплоснабжения, опирающейся на потребности экономики и общества в тепловой энергии и определяющей ориентиры и приоритеты по обеспечению этих потребностей. Такой подход способствует согласованию общегосударственной политики в области теплоснабжения с региональными и местными особенностями энергоснабжения потребителей и позволяет адаптироваться к требованиям рыночных отношений с учетом спроса на тепловую энергию,

формируемых тарифов на нее, а также платежеспособности потребителей конкретной территории. Кроме того, он учитывает особенности социально-экономического развития регионов, требования конкретных потребителей к надежности их теплоснабжения, реальные возможности экономически эффективных направлений энергоресурсосбережения, а также существующие возможности топливоснабжения и вовлечение нетрадиционных энергоресурсов.

Огромные масштабы, структурная сложность, технологические особенности, возросшие требования современных ТЭС обусловили целесообразность создания новых подходов к их построению и развитию, ориентированных на применение передовых технических решений.

Задача повышения эффективности теплоснабжающих систем непосредственно связана с наиболее общей проблемой оптимального их развития на основе энергоэффективных технологий и оборудования. Предложенная методология структурирует эту цель в виде решения нескольких взаимосвязанных задач, таких как:

- оптимизация структуры источников тепла [1], распределение нагрузок между ними [2];
- планирование теплоснабжения территорий городов с определением оптимальных зон централизации теплоснабжения [3, 4];
- анализ надежности теплоснабжения с учетом топливоснабжения [5];
- поиск мероприятий по ее повышению с определением рационального сочетания элементной и системной надежности [6];
- оптимизация направлений по развитию систем теплоснабжения с учетом множества интересов субъектов теплового хозяйства города [7, 8–14].

Решение этих вышеперечисленных задач базируется на методологии много-

¹Федяев А.В., Федяева О.Н. Комплексные проблемы развития теплоснабжающих систем: пособие для специалистов теплоэнергетической системы. Новосибирск: Наука, 2000. 254 с. / Fedyaev A.V., Fedyaeva O.N. Complex problems of heat supply systems development: manual for the specialists of the heat power system. Novosibirsk: Nauka, 2000. 254p.

уровневого структурирования и декомпозиции, современных методах математического моделирования, которые хорошо учитывают сетевую составляющую систем теплоснабжения и разнотипность источников тепла. Предлагаемая методическая и алгоритмическая база обладает универсальностью, ориентирована на обоснованный учет существующей структуры и состояния систем, позволяет вырабатывать рациональные направления развития теплоснабжающих систем, их технологического преобразования и технического переоснащения. Взаимоувязка этих задач позволяет принимать наиболее обоснованные и комплексные решения по планированию развития теплоснабжающих систем в современных условиях организации энергетики, развития новых технологий и высоких стандартов качества и надежности теплоснабжения потребителей.

Разработанный научно-методический и вычислительный инструментarium успешно применялся в ряде прикладных работ по теплоснабжению городов и регионов, в т.ч. в рамках программного документа «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Иркутской области на 2019–2023 годы»² (далее СиПР).

Разработка СиПР выполнялась в рамках реализации Постановления Правительства Российской Федерации 2009 г. «О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики»³ и была направлена на достижение следующих основных целей:

– создание эффективной и сбалансированной энергетической инфраструктуры, обеспечивающей устойчивое социально-экономическое развитие Иркутской области;

– формирование стабильных и благоприятных условий для привлечения ин-

вестиций в строительство объектов энергетики;

– эффективное использование энергетических ресурсов на территории Иркутской области.

Документ включает в себя две части: электроэнергетическую и теплоэнергетическую.

Разработка теплоэнергетической (тепломеханической) части СиПР выполнялась в три этапа:

1) анализ существующего состояния теплоэнергетики региона;

2) разработка прогнозов производства и потребления тепловой энергии до 2023 г. в Иркутской области с разбивкой по основным энергетическим узлам региона;

3) формирование направлений развития теплоэнергетической отрасли на территории Иркутской области с разработкой предложений и механизмов по их реализации.

Ниже кратко изложены основные результаты работы.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

Иркутская область является субъектом Российской Федерации и входит в состав Сибирского Федерального округа (СФО). Существующая система административно-территориального устройства Иркутской области на 1 января 2018 г. включает 10 городских округов, 32 муниципальных района, 63 городских поселений и 361 сельское поселение. Население Иркутской области составляет около 2408,9 тыс. чел., что соответствует 1,68% населения Российской Федерации. В области преобладает городское население – 1900,3 тыс. чел. (78,89 %). За последние 10 лет население области сократилось на 9,7 %. Плот-

²Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Иркутской области на 2019–2023 годы. Указ Губернатора Иркутской области С.Г. Левченко № 161-уг от 21.08.2018. Иркутск, 2018. / On approval of the scheme and program for electric power industry development in the Irkutsk Region in 2019–2023. Decree of the Governor of the Irkutsk region S.G. Levchenko No. 161-ug of 21 August 2018. Irkutsk, 2018.

³О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики. Постановление Правительства Российской Федерации № 823 от 17.10.2009. Москва, 2009. / On schemes and programs for the prospective development of electric power industry. Decree of the Government of the Russian Federation No. 823 of 17 October 2009. Moscow, 2009.



ность населения в регионе очень низкая – около 3,11 чел./км² (при средней по России – 8,57 чел./км²). При этом она неравномерно распределяется по территории области. Основными направлениями специализации области являются металлургия (производство алюминия и ферросплавов), горнодобывающая и нефтехимическая промышленность, лесопромышленный комплекс и транспорт. Ведется строительство объектов по производству поликристаллического кремния. В общероссийском разделении труда Иркутская область имеет крупнейшую энергетическую базу, обеспечивающую более 6% вырабатываемой в России электроэнергии, является поставщиком слюды, поваренной соли, золота, алюминия, древесины, химической, нефтехимической и целлюлозно-бумажной продукции, пушно-мехового сырья.

Перспективное развитие экономики и социальной сферы Иркутской области во многом связано с реализацией крупных инвестиционных проектов, ориентированных на переработку добываемого сырья (нефтегазохимия, лесопереработка), расширение существующих и разработку новых месторождений, в т.ч. редкоземельных металлов, а также инновационных преобразований транспортной системы, строительного сектора, развития действующего промышленного производства.

3. ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

В настоящее время в 10 городах области действуют теплофикационные системы с одной или несколькими теплоэлектроцентралями (ТЭЦ). Наиболее крупные из них расположены в Иркутске, Ангарске, Братске, Усть-Илимске, Усолье-Сибирском и Саянске. Они имеют развитые тепловые сети с радиусами теплоснабжения (расстояние по трассе от источника до конечного потребителя) до 15 км и с диаметрами головных магистралей до 1200 мм. Протяженность тепловых сетей в одной системе измеряется сотнями километров.

Источники тепловой энергии Иркут-

ской области отличаются большим разнообразием по типу и принадлежности:

- 12 ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго»;
- 3 ТЭЦ различных ведомств (ТЭЦ ООО «Теплоснабжение», это бывшая ТЭЦ Байкальского целлюлозно-бумажного комбината; ТЭЦ-2 филиала АО «Группа ИЛИМ» в г. Братск; ТЭЦ-2 филиала АО «Группа ИЛИМ» в г. Усть-Илимск);
- около 1010 отопительных и промышленных котельных на органическом топливе;
- примерно 198 электробойлерных;
- большое количество теплоутилизирующих установок (ТУУ) и индивидуальных отопительных печей.

Распределение источников тепла на территории области представлено на рис. 1.

Суммарная установленная мощность источников тепловой энергии в Иркутской области составляет примерно 99 тыс. ГДж/ч. При этом около 67,8% установленной тепловой мощности приходится на ТЭЦ, примерно 16,9% – на котельные, оставшиеся 15,3% – это установленная тепловая мощность теплоутилизирующих и прочих отопительных установок.

Общая протяженность тепловых сетей в Иркутской области в 2017 г. составила 3914,8 км. Доля тепловых сетей, нуждающихся в замене, достигает 35,4%, из которых 677 км являются ветхими. Около половины тепловых сетей области (46%) принадлежит ПАО «Иркутскэнерго», эксплуатация которых осуществляется предприятиями управления тепловых сетей на базе ТЭЦ. Эксплуатацией коммунальных теплоснабжающих систем занимаются муниципальные теплоэнергетические предприятия в крупных городах и муниципальные учреждения жилищно-коммунального хозяйства в других населенных пунктах области.

Источниками тепловой энергии Иркутской области за 2017 г. произведено 165,5 млн ГДж, что на 4% ниже уровня 2013 г. За рассматриваемый период объемы производства тепла на ТЭЦ котельными и ТУУ изменялись незначительно. Существенное сокращение в 2017 г. относительно уровня 2013 г. наблюдалось только на

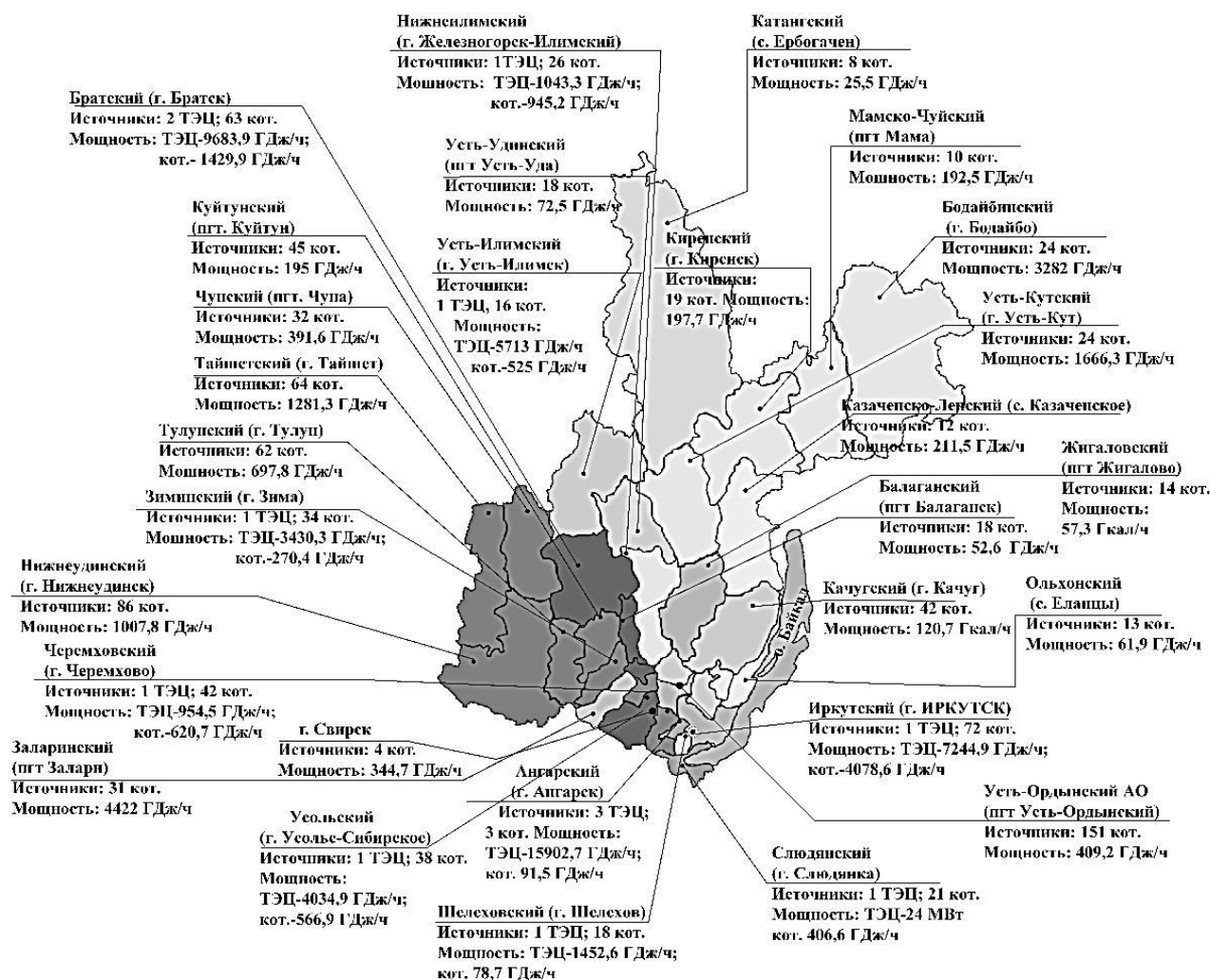


Рис. 1. Распределение источников тепла на территории Иркутской области
Fig. 1. Distribution of heat sources in the Irkutsk region

электробойлерных и составило в 2017 г. около 30%. Это, главным образом, обусловлено ростом тарифов на электроэнергию. Очевидно, что и в перспективе будет наблюдаться тенденция вытеснения электробойлерных из структуры теплоисточников.

Потребление тепловой энергии в области на конец 2017 г. составило 150 млн ГДж, что на 1,6% ниже уровня 2013 г. Наиболее значительное сокращение потребления тепловой энергии за рассматриваемый период наблюдалось в коммунально-бытовом и жилом секторах, которое достигло 12% и 4,3%, соответственно. Это снижение, прежде всего, связано с более точным учетом потребления тепловой энергии в результате внедрения теплосчетчиков, реализации энергосберегающих

мероприятий и выполнения комплекса мер в рамках региональной программы по капитальному ремонту существующего жилого фонда. В структуре теплопотребления области, в целом, за рассматриваемый период значительного изменения не произошло.

4. ПРОГНОЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

В настоящее время одной из приоритетных задач развития топливно-энергетического комплекса, в т.ч. теплоэнергетики, является снижение потребления энергоресурсов за счет реализации энергосберегающих мероприятий, обозначенных в Программе «Энергосбережение и повышение энергоэффективности на тер-



ритории Иркутской области»⁴, утвержденной в 2010 г. В связи с этим в перспективном прогнозе потребления тепловой энергии учитывается энергосберегающий эффект при реализации мероприятий по энергосбережению для существующих объектов теплоснабжения при их развитии. Реализация даже части всего энергосберегающего потенциала позволит сократить ввод необходимых новых тепловых мощностей, а также снизить финансовую нагрузку на бюджет области и населения.

На рис. 2 представлен прогноз полезного (без потерь при транспорте расхода тепла и на собственные нужды источников) потребления тепловой энергии и его структура на период до 2023 г.

Рассматривалось два сценария, основу которых представляют различные варианты развития промышленных предприя-

тий: прогноз 1 соответствует данным социально-экономического развития, положенным в основу плана электропотребления и мощности, разработанного системным оператором; прогноз 2 соответствует данным, положенным в основу Правительством Иркутской области в плане электропотребления и мощности.

Полезное (без потерь при транспорте расхода тепла и на собственные нужды источников) потребление тепловой энергии к 2023 г. увеличится по сравнению с 2017 г. на 8,3% и на 14,8% в первом и втором прогнозах, соответственно.

Потребление тепловой энергии на цели отопления и горячего водоснабжения в перспективе до 2023 г. определялось исходя из долговременного прогноза численности населения области, предполагаемого развития жилищного фонда с учетом

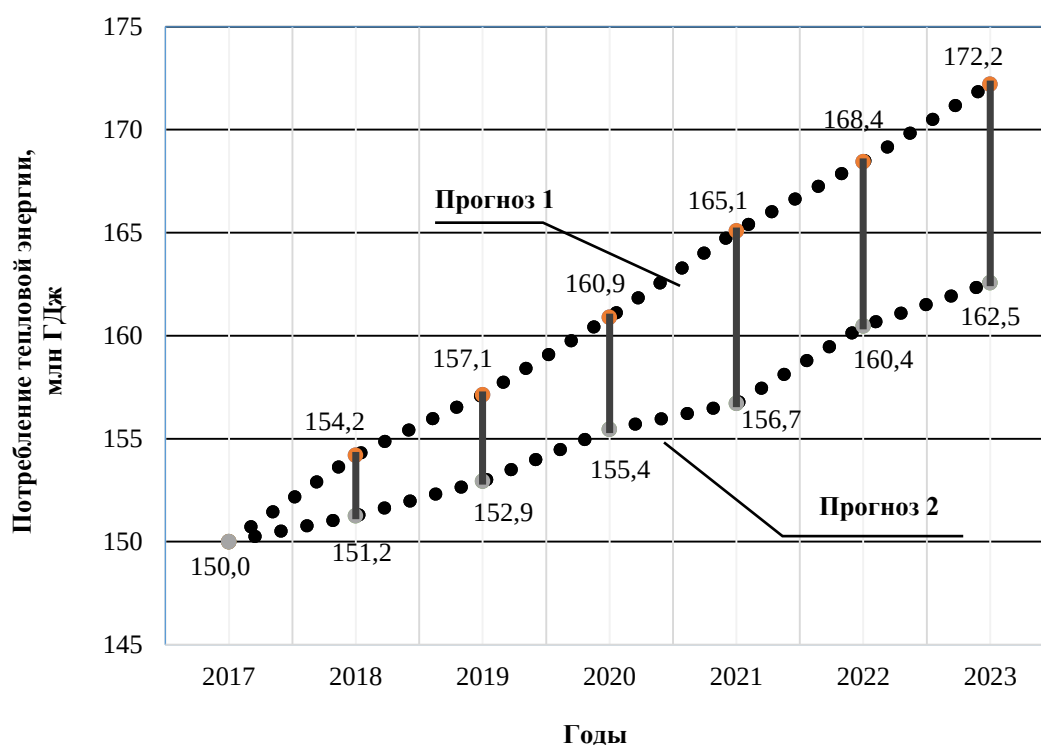


Рис. 2. Прогноз потребления тепловой энергии в Иркутской области
Fig. 2. Forecast of thermal energy consumption in the Irkutsk region

⁴Об утверждении долгосрочной целевой программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на территории Иркутской области на 2011–2015 годы и на период до 2020 г.». Постановление Правительства Иркутской области № 318-пп от 02.12.2010. Иркутск, 2010. / On approval of the long-term target program “Energy Saving and Improvement of Energy Efficiency in the Irkutsk Region in 2011–2015 and for the Period until 2020”. Decree of the Government of the Irkutsk Region No. 318-pp of 2 December 2010. Irkutsk, 2010.

удельных норм расхода тепла на отопление зданий и горячее водоснабжение. В связи с незначительным ростом населения, потребление тепловой энергии в этом секторе будет увеличиваться за счет строительства нового жилья и объектов социальной культуры.

Рост теплопотребления в промышленном секторе к 2023 г. в прогнозе 1 составит 7,2% и 8,3% – в прогнозе 2. Прирост потребления тепловой энергии предполагается в ключевых отраслях промышленности: нефтехимический сектор, переработка леса и др. Основная доля потребления тепловой энергии приходится на 9 основных городов Иркутской области.

5. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ ДО 2023 г.

Теплоэнергетический комплекс области характеризуется высокой степенью износа основного оборудования тепловых электростанций и котельных, неудовлетворительным состоянием теплосетевого хозяйства и значительным потенциалом энергосбережения. Основными направлениями развития теплоэнергетики области в ближайшей перспективе являются модернизация и техническое перевооружение существующих источников тепловой энергии, тепловых сетей, проведение мероприятий по энергосбережению, а также развитие существующих и строительство новых источников тепловой энергии в соответствии с прогнозируемыми уровнями теплопотребления. Их реализация позволит повысить эффективность энергетического комплекса и предотвратит нарастание дефицита тепловой энергии.

Развитие теплоснабжения городов и поселений Иркутской области осуществлялось в соответствии с разработанными Схемами теплоснабжения. По данным министерства жилищной политики и энергетики Иркутской области на окончание 2017 г. разработано и утверждено 174 схемы теплоснабжения.

Рассматриваемые направления раз-

вития теплоэнергетики области носят вариантный характер, прежде всего, это связано с неопределенностью вовлечения в топливный баланс области природного газа. В соответствии с корректировкой Генеральной схемы газификации и газоснабжения Иркутской области, на ее территории предусматривается формирование четырех центров газодобычи: Южного, Братского, Усть-Кутско-Киренского и Северного. На их базе возможно развитие газовой энергетики. Наличие природного газа на территории Усть-Кутского и Киренского районов Иркутской области делает возможным реализацию крупного энергетического проекта в Иркутской области, он направлен на строительство газовой электростанции в районе г. Усть-Кут, который будет ориентирован на покрытие перспективных нагрузок г. Усть-Кут, нужд Байкало-Амурской магистрали и нефтепровода Восточная Сибирь–Тихий океан. Для г. Усть-Кут в случае подачи газа в город возможна реализация четырех вариантов развития систем централизованного теплоснабжения:

- установка блочных модульных котельных в центральной части города и автономных газовых источников в районах неблагоустроенного сектора;

- использование блочных модульных котельных с дополнительным размещением Мини-ТЭЦ;

- строительство тепловой электрической станции (ТЭС) на площадке в районе с. Паниха в 16 км от г. Усть-Кут;

- строительство газовой Ленской ТЭС в масштабах территории г. Усть-Кут.

Вариант газовой Ленской ТЭС был рекомендован администрацией города в качестве основного на примере анализа технико-экономических показателей по всем рассмотренным вариантам по энергоснабжению г. Усть-Кут. Организация теплоснабжения г. Усть-Кут от газовой Ленской ТЭС позволит обеспечить качественное, экономичное и надежное теплоснабжение потребителей и закрыть 12 неэффективных котельных, большая часть из которых работает на дорогом мазуте.

Предполагается, что реализация

проекта по газификации Иркутской области позволит газифицировать основные промышленно-административные центры Иркутской области (городов Иркутск, Ангарск, Усолье-Сибирское, Черемхово), будет способствовать оптимизации структуры топливно-энергетического баланса, увеличению доли когенерационного производства энергии в регионе на базе эффективных и экологических газовых и парогазовых технологий. При этом перевод на газ действующих ТЭЦ связан с рядом ограничивающих факторов, таких как значительные инвестиции в модернизацию ТЭЦ, межтопливная конкуренция, в частности с местными углями. Поиск необходимых механизмов по устранению этих барьеров должен осуществляться в рамках договоренностей совместных рабочих групп поставщиков, потребителей газа и региональных властей.

Одним из путей развития теплоэнергетики в условиях газификации Иркутской области является внедрение парогазового цикла на действующих ТЭЦ путем проведения комплексной модернизации, которая заключается в переводе котлов на сжигание природного газа и надстройке энерго-

блоков газотурбинными установками (ГТУ). Объединение ГТУ с действующими паротурбинными установками предполагает значительную реконструкцию котлоагрегатов для сжигания газа и утилизации выхлопных газов на ГТУ, как и непосредственную установку дорогостоящих ГТУ, что требует высоких капиталовложений, поэтому комплекс подобных мероприятий требует глубокого анализа и обоснованных технических проработок. По результатам укрупненной технико-экономической оценки, проведенной с использованием фактических показателей работы ТЭЦ Иркутской области, сделаны выводы об экономической нецелесообразности проведения модернизации действующих ТЭЦ с их переводом на парогазовый цикл путем надстройки ГТУ. Капиталовложения на перевод котлов для сжигания природного газа составляют не менее 2,5–3 млн руб./(Гкал/ч), при этом капиталовложения в надстройку ГТУ по различным оценкам составляют от 750 до 850 тыс. долл./МВт. На рис. 3 показаны зоны эффективности для существующих угольных ТЭЦ и создаваемых на их базе ПГУ-ТЭЦ.

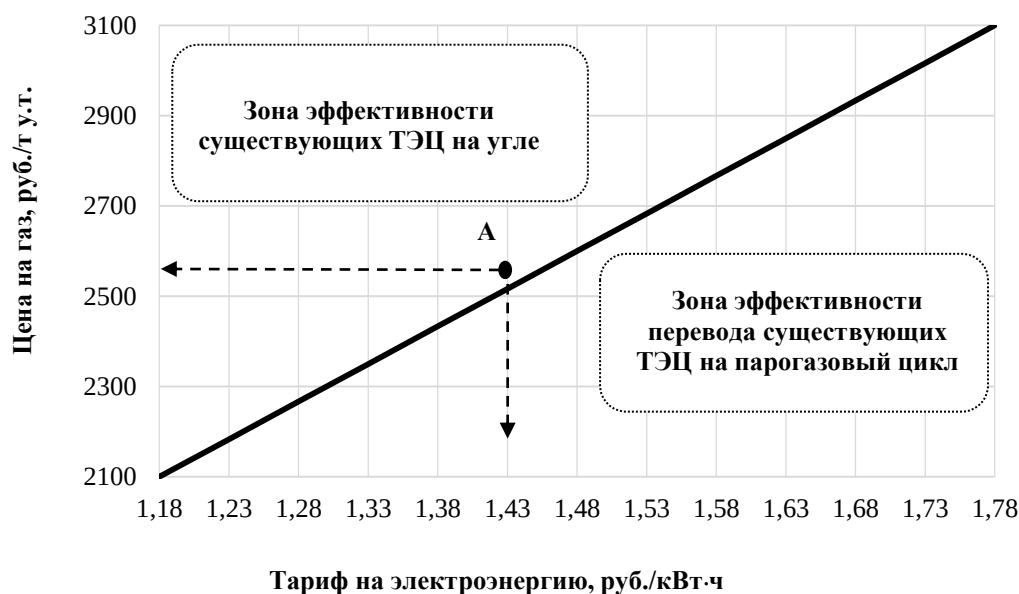


Рис. 3. Зоны эффективности проектов перевода существующих теплоэлектроцентралей на парогазовый цикл

Fig. 3. Efficiency zones of the projects of existing combined heat and power plants switch to a steam-gas cycle

Диаграмма позволяет определить целесообразный вариант развития ТЭЦ в зависимости от двух внешних параметров – цены на газ и тарифа на электроэнергию. Так, например, при тарифе 1,43 руб./кВт·ч и цене на газ чуть более 2500 руб./т у. т. (точка А) варианты существующей угольной ТЭЦ и ее модернизации в ПГУ-ТЭЦ равноэкономичны. При меньших тарифах на электроэнергию перевод действующих угольных ТЭЦ на газ представляется неэффективным.

Перевод угольных ТЭЦ на газ кроме положительного влияния на проект газификации региона и решения вопросов экологии может привести к отрицательным последствиям. В первую очередь, они связаны с нетипичными процессами в угольной отрасли. В рамках проработки вопросов газификации региона целесообразно заранее предусмотреть комплекс компенсирующих мероприятий, предотвращающих негативные последствия для социально-экономической сферы региона и обеспечивающих гармоничный переход на энергоэффективную и экологичную газовую энергетику в регионе.

Использование газа в энергетике имеет большие перспективы при создании новых мощностей.

Однако, учитывая текущую оценку баланса потребления и производства электроэнергии, наличие резервов угольной генерации и недорогих мероприятий по их развитию, а также необходимость в новых газовых энергоисточниках на юге Иркутской области в рамках рассматриваемого временного горизонта СИПР не прослеживается.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа теплоснабжающих систем Иркутской обла-

сти была получена комплексная оценка ситуации с теплоснабжением в регионе, отражающая его особенности и проблемы текущего состояния, которые позволили определить рациональные пути устранения недочетов. Выполнен прогноз потребности в тепловой энергии, учитывающий развитие городов и промышленных узлов, предложены пути развития генерации для ее покрытия. Проанализирована возможность адаптации сложившейся инфраструктуры теплоснабжения к меняющимся внутренним и внешним факторам, проведена оптимизация теплоснабжающих систем (с привязкой к территориям развития теплогенерирующих мощностей и сетевой инфраструктуры), обеспечивающая гарантированное теплоснабжение потребителей и эффективное функционирование теплоснабжающих систем на период до 2023 г. с учетом динамики роста спроса на тепловую энергию и особенностей развития экономики региона. Определены перспективные направления развития централизованного и децентрализованного теплоснабжения в области. Рассмотрены энергоэффективные технологии производства энергии на базе когенерации с соответствующими техническими решениями, в т.ч. с возможностью перспективного внедрения современных парогазовых технологий. Разработаны рекомендации по объемам и срокам реконструкции действующих и внедрению новых теплоэнергетических объектов по годам на период до 2023 г. Разработаны механизмы формирования стабильных и благоприятных условий привлечения инвестиций для создания эффективной и сбалансированной теплоэнергетической инфраструктуры, обеспечивающей социально-экономическое развитие и повышение экологических показателей использования энергии и топливных ресурсов на территории Иркутской области.

Библиографический список

1. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V., Lund H., Hvelplund F. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable

energy systems // Energy. 2014. Vol. 68. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

2. Новицкий Н.Н., Шалагинова З.И., Алексеев А.В., Токарев В.В., Гребнева О.А., Вантеева О.В., Луцен-



ко А.В., Михайловский Е.А. Современное состояние и задачи интеллектуализации систем теплоснабжения // Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: труды XVI Всерос. конф. (г. Иркутск, 3–9 сентября 2018 г.). Иркутск, 2018. С. 262–294.

3. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga A., Blumberga D. The effect of energy efficiency improvements on the development of 4th generation district heating // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 95. P. 522–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.07>

4. Новицкий Н.Н. Интеллектуальные трубопроводные системы: аргументы, содержание, перспективы // *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2011. № 101. С. 456–463.

5. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 1987. 220 с.

6. Mehleri E.D., Sarimveis H., Markatos N.C., Papageorgiou L.G. Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 51. P. 331–342.

7. Penoncello S.G. Thermal Energy Systems. Design and Analysis. M., а что это здесь?? Idaho: University of Idaho, 2015. 546 p.

8. Хрилев Л.С., Смирнов И.А. Оптимизация систем теплоснабжения и централизованного теплоснабже-

ния. М.: Энергия, 1978. 264 с.

9. Postnikov I.V., Stennikov V.A., Mednikova E.E., Penkovskii A.V. Methodology for optimization of component reliability of heat supply systems // *Applied Energy*. 2018. Vol. 227 (C). P. 365–374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.073>

10. Еделева О.А. Выбор методического подхода для решения задачи оптимального развития энергоисточников в теплоснабжающих системах городских территорий // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 5–6. С. 58–68.

11. Стенников В.А., Хамисов В.О., Стенников Н.В. Оптимизация совместной работы источников тепловой энергии // *Электрические станции*. 2011. № 3. С. 27–33.

12. Stennikov V.A., Mednikova E.E. Analysis of trends in the development of cities' heat supply systems. *Thermal engineering*. 2016. Vol. 63. No. 9. P. 657–665. DOI: 10.1134/S0040601516090068

13. Stennikov V.A., Iakimets E.E. Optimal planning of heat supply systems in urban areas // *Energy*. 2016. № 110. P. 157–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.060>

14. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: methodological support for a comprehensive analysis of fuel and heat supply reliability // *Sustaining power resources through energy optimization and engineering*. Hershey PA: Engineering Science Reference. 2016. P. 102–126. DOI: 10.4018/978-1-4666-9755-3.ch005

References

1. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsten J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V., Lund H., Hvelplund F. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 2014, vol. 68, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

2. Novitsky N.N., Shalaginova Z.I., Alekseev A.A., Tokarev V.V., Grebneva O.A., Lutsenko A.V., Vanteeva O.V., Mikhailovsky E.A. Sovremennoe sostoyanie i zadachi intellektualizatsii sistem teplosnabzheniya [Current state and problems of heat supply system intellectualization]. *Trudy XVI Vserossiyskoj konferencii "Matematicheskie modeli i metody analiza i optimal'nogo sinteza razvivayushchih sistem truboprovodnykh i gidravlicheskikh sistem"* [Proceedings of XVI All-Russian Conference "Mathematical models and methods of analysis and optimal synthesis of developing pipeline and hydraulic systems", Irkutsk, 3–9 September 2018]. Irkutsk, 2018, pp. 262–294. (In Russ.).

3. Ziemele J., Gravelins A., Blumberga A., Blumberga D. The effect of energy efficiency improvements on the development of 4th generation district heating. *Energy Procedia*, 2016, vol. 95, pp. 522–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.07>

4. Novitsky N.N. Intelligent piping systems: arguments, content, prospects. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура* [Utilities in cities.

Series: Engineering and Architecture], 2011, no. 101, pp. 456–463.

5. Senanova E.V., Sidler V.G. *Matematicheskoe modelirovaniye i optimizatsiya razvivayushchikhsya teplosnabzhayushchikh sistem* [Mathematical modeling and optimization of developing heat supply systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1987, 220 p. (In Russ.).

6. Mehleri E.D., Sarimveis H., Markatos N.C., Papageorgiou L.G. Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. *Renewable Energy*, 2013, vol. 51, pp. 331–342.

7. Penoncello S.G. Thermal Energy Systems. Design and Analysis. Idaho: University of Idaho, 2015, 546 p.

8. Khrilyov L.S., Smirnov I.A. *Optimizatsiya sistem teplofikatsii i tsentralizovannogo teplosnabzheniya* [Optimization of heat supply systems and centralized heating supply]. Moscow: Energia Publ., 1978, 264 p. (In Russ.).

9. Postnikov I.V., Stennikov V.A., Mednikova E.E., Penkovskii A.V. Methodology for optimization of component reliability of heat supply systems. *Applied Energy*, 2018, vol. 227 (C), pp. 365–374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.073>

10. Edeleva O.A. The choice of an approach to study the problems of energy sources optimum development in the urban heat supply systems. *Izvestiya vysshikh*

uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki [Power Engineering: Research, Equipment, Technology], 2017, vol. 19, no. 5–6, pp. 58–68. (In Russ.).

11. Stennikov V.A., Hamisov V.O., Stennikov N.V. Optimization of the joint work of thermal energy sources. *Elektricheskie stancii* [Electrical Stations], 2011, no. 3, pp. 27–33. (In Russ.).

12. Stennikov V.A., Mednikova E.E. Analysis of trends in the development of cities' heat supply systems. *Thermal engineering*, 2016, vol. 63, no. 9, pp. 657–665. DOI: 10.1134/S0040601516090068

13. Stennikov V.A., Iakimetc E.E. Optimal planning of heat supply systems in urban areas. *Energy*, 2016, no. 110, pp. 157–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.060>

14. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Problems of modeling and optimization of heat supply systems: methodological support for a comprehensive analysis of fuel and heat supply reliability. *Sustaining power resources through energy optimization and engineering*. Hershey PA: Engineering Science Reference, 2016, pp. 102–126. DOI: 10.4018/978-1-4666-9755-3.ch005

Критерии авторства

Стенников В.А., Постников И.В., Еделева О.А., Медникова Е.Е., Добровольская Т.В., Соколов П.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов. Пеньковский А.В. несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Stennikov V.A., Postnikov I.V., Edeleva O.A., Mednikova E.E., Dobrovolskaya T.V., Sokolov P.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results. Penkovskiy A.V. bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Стенников Валерий Алексеевич,

член-корреспондент, директор,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: sva@isem.irk.ru

Пеньковский Андрей Владимирович,

старший научный сотрудник,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: penkovsky@isem.irk.ru

Постников Иван Викторович,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: postnikov@isem.irk.ru

Еделева Ольга Алексеевна,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: edel@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valeriy A. Stennikov,

Corresponding Member, Director,
Melentiev Energy Systems
Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
✉ e-mail: sva@isem.irk.ru

Andrei V. Penkovskiy,

Senior Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: penkovsky@isem.irk.ru

Ivan V. Postnikov,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: postnikov@isem.irk.ru

Olga A. Edeleva,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: edel@isem.irk.ru



Медникова Екатерина Евгеньевна,
младший научный сотрудник,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: yakimetse@isem.irk.ru

Добровольская Татьяна Владимировна,
ведущий инженер,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: makarova@isem.irk.ru

Соколов Павел Александрович,
ведущий инженер,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: tramp@isem.irk.ru

Ekaterina E. Mednikova,
Junior Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: yakimetse@isem.irk.ru

Tatiana V. Dobrovolskaya,
Leading Engineer,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: makarova@isem.irk.ru

Pavel A. Sokolov,
Leading Engineer,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: tramp@isem.irk.ru



Эффективность использования солнечных батарей с целью снижения затрат на потребляемую электроэнергию

© А.В. Байшев*, А.С. Торопов**

*Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан, Россия

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

Резюме: Цель – оценка эффективности использования параллельно работающих с электрической сетью солнечных электростанций для организаций и предприятий Республики Хакасия, ведущих расчет за электроэнергию по нерегулируемому тарифу. Исследование проведено при помощи визуального анализа графиков исходных данных, статистического и компьютерного моделирования с использованием программы PVSYST. Выполнен анализ электропотребления и тарифов на электроэнергию рассматриваемых объектов. Обосновано применение солнечной электростанции, работающей параллельно с существующей электрической сетью. Выбрана структурная схема солнечной электростанции и способ ее подключения. Определены капиталовложения в объекты. Рассчитаны сроки окупаемости электростанций. Наибольший эффект дает применение параллельно работающих с сетью солнечных электростанций для предприятий и организаций, ведущих расчет за электроэнергию по нерегулируемым тарифам первой ценовой категории. Применение параллельно работающих с сетью солнечных электростанций целесообразно без выдачи мощности в централизованную электрическую сеть в связи со сложностью оформления такого подключения и низкими закупочными ценами на электроэнергию.

Ключевые слова: электроэнергия, электрическая нагрузка, солнечная электростанция, солнечная батарея, сетевой инвертор, тариф на электроэнергию

Информация о статье: Дата поступления 13 марта 2019 г.; дата принятия к печати 11 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Байшев А.В., Торопов А.С. Эффективность использования солнечных батарей с целью снижения затрат на потребляемую электроэнергию. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):764–774. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-764-774

Efficiency of using solar panels for consumed electricity cost reduction

Anatoliy V. Baishev, Andrey S. Toropov

Khakass State University named after N. F. Katanov, Abakan, Russia

Khakass Technical Institute, Branch of the Siberian Federal University, Abakan, Russia

Abstract: The purpose of the paper is to evaluate the efficiency of using solar power plants operated in parallel with the electric grid for the companies and enterprises of the Republic of Khakassia which being charged for electricity at the unregulated rate. The study involves the visual analysis of input data graphs, statistical and computer modeling using PVSYST software. The electricity consumption and electricity rates of the objects under consideration are analyzed. The use of solar power plants operated in parallel with the existing electric grid is justified. The block diagram of the solar power plant and its connection method are chosen. Investments in facilities are determined. Power plant payback periods are calculated. The use of solar power plants operating in parallel with the grid has the greatest effect for the enterprises and companies being charged for electricity by unregulated rates of the first price category. The use of parallel solar power plants is advisable without power delivery to the centralized electrical grid due to the complexity of this connection and low purchase prices for electricity.

Keywords: electrical energy, electrical load, solar power plant, solar cell, grid-tied inverter, electricity rate

Information about the article: Received March 13, 2019; accepted for publication July 11, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Baishev A.V., Toropov A.S. Efficiency of using solar panels for consumed electricity cost reduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):764–774. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-764-774

1. ВВЕДЕНИЕ

Затраты на электроэнергию входят в структуру общих расходов предприятий и организаций, они могут составлять значительную часть в себестоимости продукции. В условиях рыночной экономики тарифы на электроэнергию имеют тенденцию к росту. Повышение тарифов негативно сказывается на предприятиях и организациях, ведущих расчеты по расценкам розничного рынка для электроэнергии и мощности (РРЭМ), которые значительно выше тарифов оптового рынка. Таким образом, становится актуальным проведение мероприятий по снижению затрат на электроэнергию для предприятий и организаций, ведущих расчеты за электроэнергию на РРЭМ.

Следует отметить, что наряду с общеизвестными энергосберегающими мероприятиями, способствующими снижению затрат на электроэнергию, может использоваться установка работающих параллельно с электрической сетью солнечных электростанций (СЭС). Рассматриваемые СЭС малой мощности (не более 100 кВт) состоят из солнечных батарей, сетевого инвертора и не содержат аккумуляторных батарей (АКБ). Указанное мероприятие в настоящее время в Российской Федерации практически неактуально, но в перспективе в нашей стране возможно проявление интереса к нему по причинам устойчивого роста тарифов на электроэнергию, снижения стоимости солнечных панелей и повышения их коэффициента полезного действия (КПД).

Применение параллельно работающих с сетью СЭС является наиболее распространенным способом их использования в мировой практике [1–3]. Например, в Германии в 2009 г. была зафиксирована выработка такими электростанциями 90% от всего объема возобновляемой генерацией. Организация или предприятие, устанавливающие подобную систему, получают возможность покрытия части своего дневного графика электропотребления за счет СЭС, снижая потребление из централизованной электрической сети.

По сравнению с СЭС, использующей аккумуляторы, рассматриваемый тип СЭС имеет ряд преимуществ: более низкую стоимость из-за отсутствия аккумуляторов и контроллеров заряда, высокую надежность, большой срок службы [4]. АКБ имеет период эксплуатации не более 10 лет, а солнечные батареи 15–30 лет. Таким образом, за время эксплуатации СЭС с аккумуляторами придется несколько раз производить замену АКБ, что увеличивает эксплуатационные затраты.

Особый интерес представляет использование параллельно работающих с электрической сетью СЭС малой мощности для зданий государственных организаций: образовательных и медицинских учреждений, муниципалитетов и органов государственной власти, где применение этого метода может позволить снизить нагрузку на бюджеты разного уровня. Рассматриваемый тип СЭС также могут использовать представители малого и среднего бизнеса. Представленные выше категории потребителей ведут расчет за электроэнергию по нерегулируемым тарифам для юридических лиц. Получаемая в результате внедрения параллельно работающих с электрической сетью СЭС экономия на оплате за электроэнергию для указанных потребителей позволит повысить их прибыль и устойчивость перед тарифными колебаниями.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является оценка эффективности использования параллельно работающих с электрической сетью СЭС для организаций Республики Хакасия, ведущих расчет за электроэнергию на РРЭМ по нерегулируемому тарифу.

3. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Функциональная схема параллельно работающей с сетью СЭС представлена на рис. 1. Солнечные батареи преобразуют солнечную энергию в электроэнергию по-



стоянного тока. Сетевой инвертор перерабатывает постоянный ток от солнечных батарей в переменное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц и осуществляет автоматическую синхронизацию СЭС с электрической сетью. Инвертор может обладать функцией ограничения выдаваемой в сеть мощности СЭС. Электроэнергия, выработанная СЭС, через счетчик выработанной энергии поступает в электрическую сеть потребителя. Учет электроэнергии, поступающей из электрической сети энергосистемы, осуществляется отдельным (расчетным) счетчиком. Счетчик выработанной СЭС энергии не предназначен для расчетов за электроэнергию, он используется только для контроля выработки энергии СЭС. Требования к значению класса точности этого счетчика не предъявляются.

В качестве объекта применения параллельно работающей с сетью СЭС в работе рассмотрен Хакасский технический институт (филиал ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»). В частности, рассмотрены здания учебных корпусов «А» и «Б», находящиеся в разных частях города на расстоянии 2 км. Выбор объекта обусловлен тем, что институт является организацией, которая ведет расчет за электроэнергию по нерегулируемому тарифу пер-

вой ценовой категории [5]. Для корпуса «Б» используется тариф для напряжения 0,4 кВ, а для корпуса «А» – тариф для напряжения 10 кВ, т.к. рядом с корпусом расположена трансформаторная подстанция. Таким образом, в работе можно сравнить экономический эффект и срок окупаемости СЭС в зависимости от уровня напряжения используемого тарифа.

Для более точного определения установленной мощности СЭС ($P_{СЭС}$) была собрана и проанализирована информация о потребляемой объектом мощности. С этой целью на вводные распределительные устройства учебных корпусов устанавливался регистрирующий прибор «Энергомонитор 3.3 Т1».

Значение установленной мощности СЭС определялось с учетом того, что потребляемая мощность в выходные дни существенно ниже, чем в рабочие. Наиболее полное использование установленной мощности СЭС в любой день недели будет в том случае, если данный критерий выбрать по утроенному значению наименьшей пиковой фазной мощности выходных дней:

$$P_{СЭС} = 3 \cdot P_{\text{пик, ф, min, вых}} \quad (1)$$

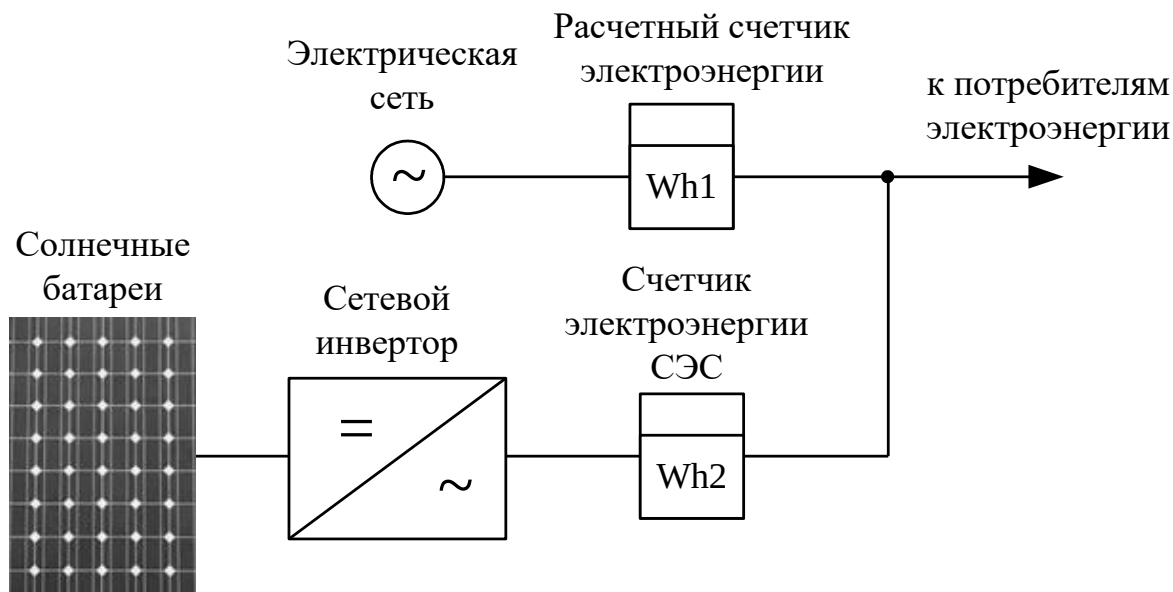


Рис. 1. Схема параллельно работающей с сетью солнечной электростанции
Fig. 1. Diagram of a solar power station operated in parallel with a power grid

Если взятую мощность параллельно работающей с сетью СЭС принять больше указанного выше значения, то в выходные и праздничные дни инвертор будет ограничивать выработку солнечных батарей, чтобы энергия не поступала в электроэнергетическую систему. Установленная мощность СЭС при этом используется не полностью, что приводит к увеличению сроков окупаемости СЭС.

Выдача электроэнергии СЭС в электроэнергетическую систему нецелесообразна в связи со сложностью оформления документации на станции и низкими закупочными ценами на генерируемую электроэнергию, которые составляют 30–40% от тарифа на потребляемую электроэнергию. Использование АКБ для аккумуляции

излишков выработки СЭС приводит к усложнению ее схемы, удорожанию как самой СЭС, так и ее эксплуатации [6, 7].

Значение установленной мощности параллельно работающей с сетью СЭС должно соответствовать номинальной мощности ее инвертора ($P_{инв}$). Инверторы выпускаются на стандартные значения номинальных мощностей. Следовательно, при выборе мощности инвертора нужно сформировать диапазон установленной мощности СЭС, который формируется путем прибавки к рассчитанному значению $P_{СЭС}$ мощности величиной 1–2 кВт как в большую, так и в меньшую сторону. Результаты расчета мощности СЭС и инверторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения мощностей СЭС и инверторов

Table 1

Calculated values of electric power of solar power plants and inverters

Объект	$P_{СЭС}$, кВт	Диапазон значений $P_{инв}$, кВт
Корпус «А»	26	24-27
Корпус «Б»	3	2-4

Выбранный инвертор должен соответствовать не только диапазону установленной мощности, но и ряду технических требований, предъявляемым к нему. В частности, при наличии трехфазной сети следует применять трехфазные инверторы с синусоидальной формой выходного сигнала [8]. Инвертор должен содержать функцию ограничения отдачи мощности в централизованную электрическую сеть. Указанная функция ограничивает вырабатываемую СЭС мощность на уровне потребляемой объектом энергии, не позволяя

сбрасывать в централизованную электрическую сеть излишки выработанной электроэнергии.

Расчет числа и мощности солнечных панелей (СП) производим в программе PVSYST [9–14], т.к. этот способ учитывает множество факторов, которые при ручных расчетах достаточно сложно учесть. Программа PVSYST – один из наиболее точных инструментов для проектирования различных по конструкции и мощности СЭС. Стоимость выбранного оборудования представлена в табл. 2.

Таблица 2

Стоимость оборудования без учета монтажных работ

Table 2

Equipment cost with disregard for installation works

Объект и его стоимость, руб.	Корпус «А»	Корпус «Б»
Инвертор	299000	99710
Солнечные панели	1242000	129600
Электросчетчик	2300	2300
Итого	1543300	231610



Расчет капиталовложений в СЭС (с учетом проектно-изыскательских и строительно-монтажных работ) выполнялся по данным примерной оценки реализованных в регионе проектов. Для оценки экономического эффекта от внедрения СЭС в программе PVSYST была рассчитана годовая выработка СЭС, затем (с учетом тарифов на электроэнергию) был определен срок окупаемости СЭС. Расчеты проводились с учетом действующих в 2018 г. цен на оборудование и электроэнергию.

Динамика изменения тарифов на электроэнергию с января 2012 г. по декабрь 2018 г. для рассматриваемых объектов представлена на рис. 2. Информация взята с официального сайта гарантирующего поставщика электроэнергии [5]. Рассматриваемые в работе объекты получают электроэнергию по нерегулируемым тарифам первой ценовой категории. Цены на электроэнергию взяты с учетом налога на

добавленную стоимость (НДС).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Графики электрической нагрузки представлены на рис. 3, 4. На приведенных графиках P_a , P_b , P_c – электрические мощности фаз a , b и c ; $P_{\text{сум}}$ – суммарная электрическая мощность трех фаз. Анализ полученных данных показал неравномерность нагрузки учебных корпусов по фазам, что связано с преобладанием однофазных электроприемников. Электропотребление корпуса «А» в пиковые часы в 10 раз больше, чем у корпуса «Б». Графики электрической нагрузки корпуса «А» имеют более высокую базовую часть в отличие от графиков корпуса «Б». Графики имеют выраженные дневные пики в рабочие дни. Нагрузка выходных дней не содержит дневных пиков.

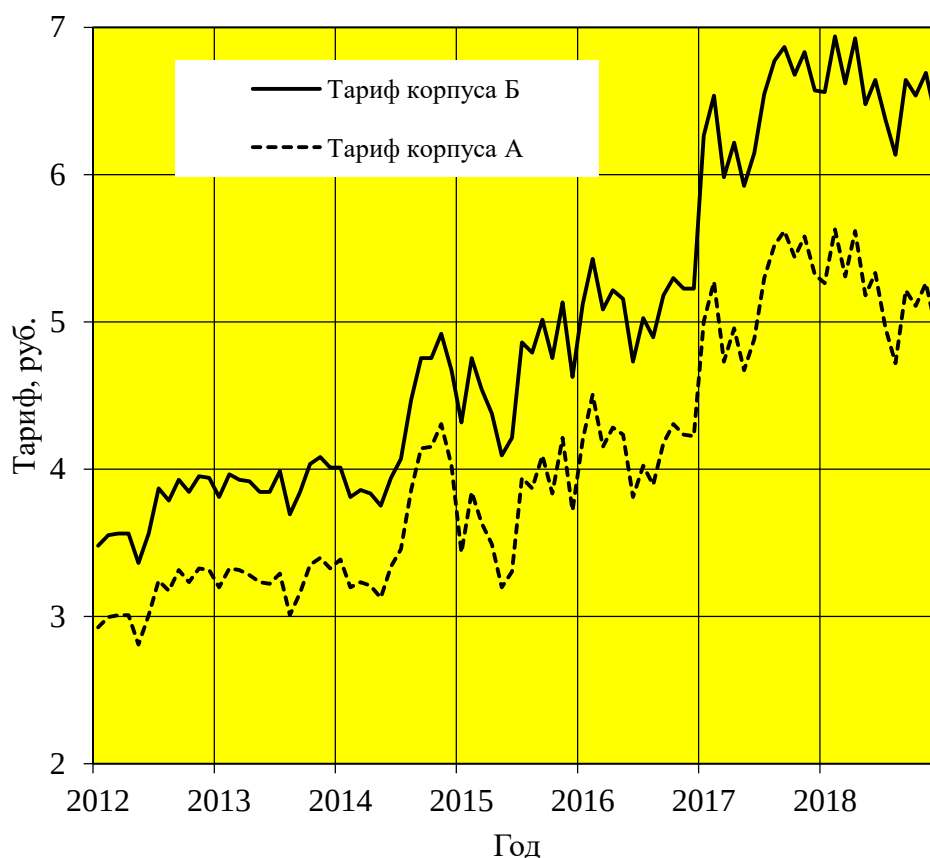


Рис. 2. Динамика тарифов на электроэнергию
Fig. 2. Electricity rate dynamics

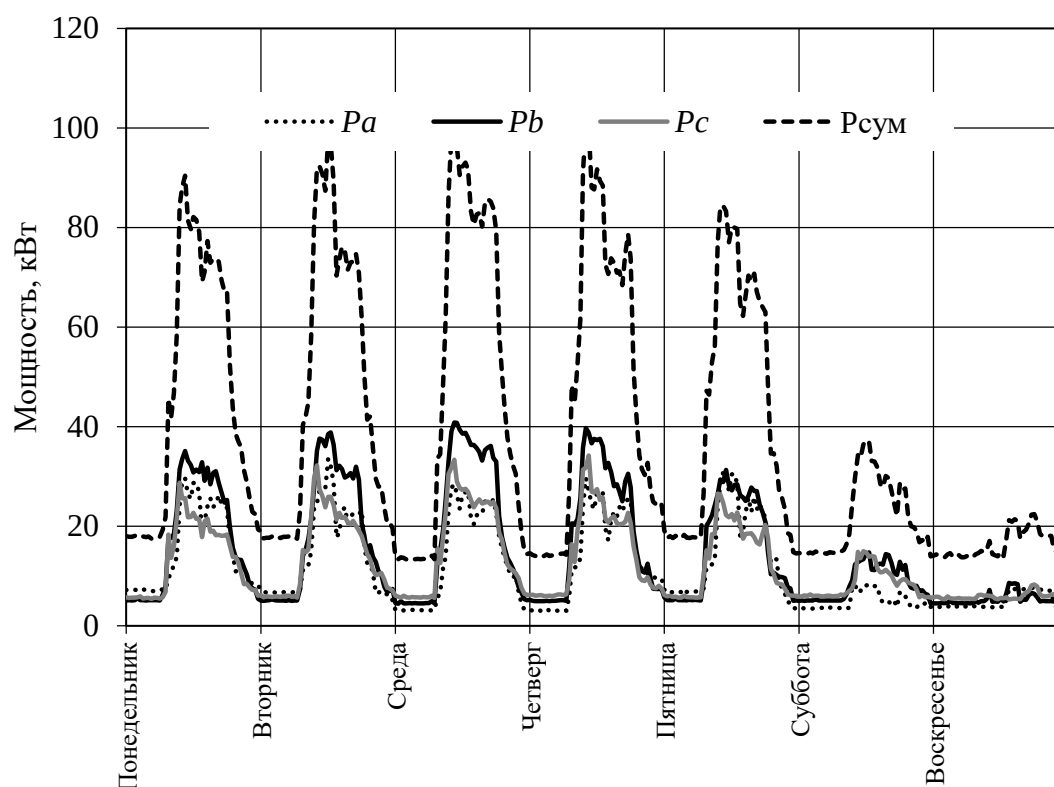


Рис. 3. Графики электрической нагрузки корпуса «А»
 Fig. 3. Graphs of building «A» electrical load

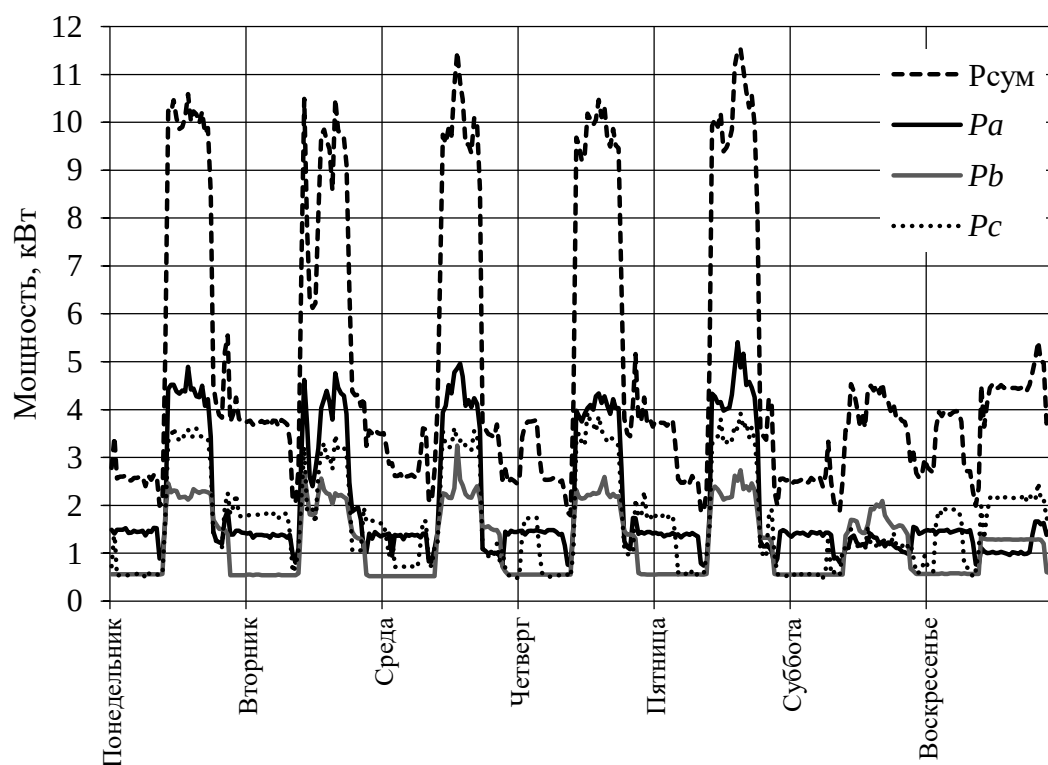


Рис. 4. Графики электрической нагрузки корпуса «Б»
 Fig. 4. Graphs of building «B» electrical load



С использованием графиков электрической нагрузки были определены минимальные и максимальные значения потребляемой мощности по каждой фазе и суммарной трехфазной мощности (табл. 3).

С помощью графиков электрической нагрузки и с учетом технических требований для СЭС были выбраны инверторы (табл. 4).

С использованием программы PVSYST были выбраны поликристалличе-

ские солнечные панели (табл. 5)

Для учета электроэнергии, вырабатываемой СЭС, выбираем два трехфазных однотарифных счетчика электроэнергии «Меркурий 231 АМ-01» стоимостью 2300 руб. каждый.

Результаты расчетов капиталовложений в СЭС представлены в табл. 6.

Результаты расчета сроков окупаемости представлены в табл. 7. Срок окупаемости рассчитан без учета роста тарифа.

Таблица 3

Минимальные и максимальные значения потребляемой мощности

Table 3

Minimum and maximum values of consumed electric power

Мощность, кВт	$P_{\text{сум}}$	P_a	P_b	P_c
Здание корпуса «А»				
Максимальная	105,2	33,57	41,25	36,1
Минимальная	13,32	2,93	4,46	5,17
Здание корпуса «Б»				
Максимальная	11,53	5,41	3,25	4,05
Минимальная	1,79	0,7	0,51	0,48

Таблица 4

Характеристики выбранных инверторов

Table 4

Characteristics of selected inverters

Объект	$P_{\text{инв}}$, кВт	Срок службы, лет	Модель инвертора	КПД, %	Цена, руб.
Корпус «А»	26	25	Fronius Eco 27.0-3-S	98,3	299000
Корпус «Б»	3		Fronius Symo 3.0-3-M		99710

Таблица 5

Параметры солнечных панелей

Table 5

Parameters of solar panels

Объект	$P_{\text{СЭС}}$, кВт	Наименование солнечных панелей	Мощность, кВт	Количество	Площадь, м ²	Цена комплекта, руб.
Корпус «А»	26	FSM-260P	29,9	115	187,5	1242000
Корпус «Б»	3		3,12	12	19,3	129600

Таблица 6

Капиталовложения в СЭС

Table 6

Investment in solar power plants

Объект	Корпус «А»	Корпус «Б»
Затраты на проектно-изыскательские и строительно-монтажные работы, %	20	20
Капиталовложения в оборудование, руб.	1543300	231610
Стоимость проектно-изыскательских и строительно-монтажных работ, руб.	308 660	46 322
Итого, руб.	1851960	277 932

Таблица 7

Сроки окупаемости солнечных электростанций

Table 7

Payback periods of solar power plants

Объект	Корпус «А»	Корпус «Б»
Установленная мощность, кВт	26	3
Капиталовложения в систему, руб.	1851960	277932
Выработка в год, кВт·ч	40006	4599,5
Тарифная ставка, руб./кВт·ч	5,21	6,58
Годовая экономия от установки СЭС, руб.	208431	30265
Срок окупаемости, лет	8,9	9,2

Результаты расчетов показали, что срок окупаемости СЭС малой мощности (3 кВт) для корпуса «Б» несколько больше, чем срок окупаемости СЭС с более высокой установленной мощностью (26 кВт) для корпуса «А». Различие сроков окупаемости объясняется удешевлением единичной мощности инвертора с ростом его номинальной мощности (табл. 8). Даже несмотря на более дешевый тариф корпуса «А», из-за стоимости инвертора срок окупаемости для этого корпуса оказался меньше, чем для корпуса «Б».

Разницу в стоимости 1 кВт установленной мощности инвертора можно объяс-

нить тем, что выбор моделей трехфазных инверторов малой мощности (до 10 кВт) небольшой, а цены на них достаточно высокие.

Произведенный выше расчет сроков окупаемости СЭС является приближенным, т.к. в расчете не учтен фактор устойчивого роста тарифов на электроэнергию.

Анализ тарифов на электроэнергию показал, что за период с 2012 по 2018 годы среднегодовые тарифы увеличились на 67,4% для корпуса «А» и на 77,7% для корпуса «Б». Средний годовой рост тарифов за рассмотренный период составляет 9,3% для корпуса «А» и 10,3% для корпуса «Б».

Таблица 8

Определение удельной стоимости установленной мощности инвертора

Table 8

Calculation of the unit cost of installed inverter power

Наименование инвертора	$P_{уст}$, кВт	Цена, руб.	Удельная стоимость, руб./кВт
Fronius Eco 27.0-3-S	26	299000	11500
Fronius Symo 3.0-3-M	3	99710	33237



Используя в качестве исходных средние значения тарифов за 2018 г. и рассчитанные ранее значения среднего годового роста тарифов, были пересчитаны сроки окупаемости. Значения сроков окупаемости СЭС, посчитанные с учетом роста тарифов на электроэнергию, составили 6,5 года для корпуса «А» и 6,9 года для корпуса «Б».

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование работающих параллельно с сетью СЭС в качестве энергосберегающего мероприятия весьма перспективно для предприятий и организаций, ведущих расчет за электроэнергию по нерегулируемым тарифам.

2. Наибольший эффект от применения параллельно работающих с сетью СЭС будет наблюдаться для предприятий и организаций, ведущих расчет за электроэнергию по тарифам первой ценовой категории для низкого напряжения (0,4 кВ) при условии использования СЭС с установленной мощностью более 20 кВт. СЭС в этом случае окупится быстрее, чем при использовании маломощной СЭС и тарифа на электроэнергию для напряжения 10 кВ.

3. Применение параллельно работающих с сетью СЭС целесообразно без выдачи мощности в централизованную электрическую сеть в связи со сложностью оформления такого подключения и низкими закупочными ценами на электроэнергию.

Библиографический список

1. Allouhi A., Saadani R., Kousksou T., Saidur R., Jamil A., Rahmoune M. Grid-Connected PV Systems Installed on Institutional Buildings: Technology Comparison, Energy Analysis and Economic Performance // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 130. P. 188–201.
2. Dabou R., Bouchaafa F., Arab A.H., Bouraiou A., Draou M.D., Neçaibia A., Mostefaoui M. Monitoring and performance analysis of grid connected photovoltaic under different climatic conditions in south Algeria // *Energy Convers and Management*. 2016. Vol. 130. P. 200–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.058>
3. Eltawil M.A., Zhao Z. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14 (1). P. 112–129.
4. Байшев А.В., Торопов А.С. Параллельная работа с сетью солнечных электро-станций частных жилых домов // *Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова*. 2017. № 19. С. 8–9.
5. Фактические нерегулируемые цены для конечных потребителей [Электронный ресурс]. URL: http://www.abakanenergo.ru/electricity_market/legal/actual_unregulated_prices_to_final_consumers.php (24.01.2019).
6. Maammeur H., Hamidat A., Loukarfi L., Missoum M., Abdeladim K., Nacer T., Performance investigation of grid-connected PV systems for family farms: case study of North-West of Algeria // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 78. P. 1208–1220.
7. Ghenai C., Merabet A., Salameh T., Pigem E.C. Grid-tied and stand-alone hybrid solar power system for desalination plant // *Desalination*. 2018. Vol. 435. P. 172–180.
8. Arab M., Zegaoui A., Allouache H., Kellal M., Petit P., Aillerie M. Micro-controlled Pulse Width Modulator Inverter for Renewable Energy Generators // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 50. P. 832–840.
9. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 5. С. 49–55.
10. Irwan M., Amelia A.R., Irwanto M., Fareq M., Leow W.Z., Gomes N., Safwati I. Stand-Alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYST Software // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 79. P. 596–603.
11. Kumar N.M., Kumar M.R., Rejoice P.R., Mathew M. Performance Analysis of 100 kWp Grid connected Sipoly Photovoltaic System using PVSYST Simulation Tool // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 117. P. 180–189.
12. Patel N., Gupta N., Kumar A., Verma A. Multifunctional Grid Interactive Solar Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2018. Vol. 8. No. 4. P. 2116–2130.
13. Tarigan E., Djuwari, Kartikasari F.D. Technoeconomic Simulation of a Grid-connected PV System Design as Specifically Applied to Residential in Surabaya, Indonesia // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 65. P. 90–99.
14. Yilmaz S., Ozcalik H.R., Kesler S., Dincer F., Yelmen B. The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation—A case study in Kahramanmaraş, Turkey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. P. 1015–1024.

References

1. Allouhi A., Saadani R., Kousksou T., Saidur R., Jamil A., Rahmoune M. Grid-Connected PV Systems Installed on Institutional Buildings: Technology Comparison, Energy Analysis and Economic Performance. *Energy and Buildings*, 2016, vol. 130, pp. 188–201.
2. Dabou R., Bouchaafa F., Arab A.H., Bouraiou A., Draou M.D., Neçaibia A., Mostefaoui M. Monitoring and performance analysis of grid connected photovoltaic under different climatic conditions in south Algeria. *Energy Convers and Management*, 2016, vol. 130, pp. 200–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.058>
3. Eltawil M. A., Zhao Z. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14(1), pp. 112–129.
4. Baishev A.V., Toropov A.S. Operation in Parallel with Network of Solar Electric Generating Stations of Private Houses. *Vestnik khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova* [Bulletin of Khakass State University named after N.F. Katanov], 2017, no. 19, pp. 8–9. (In Russ.).
5. *Fakticheskie nereguliruemye ceny dlya konechnykh potrebitel'ev* [Actual unregulated prices for end users]. URL: http://www.abakanenergo.ru/electricity_market/legal/actual_unregulated_prices_to_final_consumers.php (24 January 2019).
6. Maamneur H., Hamidat A., Loukarfi L., Missoum M., Abdeladim K., Nacer T., Performance investigation of grid-connected PV systems for family farms: case study of North-West of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 78, pp. 1208–1220.
7. Ghenai C., Merabet A., Salameh T., Pigem E.C. Grid-tied and stand-alone hybrid solar power system for desalination plant. *Desalination*, 2018, vol. 435, pp. 172–180.
8. Arab M., Zegaoui A., Allouache H., Kellal M., Petit P., Aillerie M. Micro-controlled Pulse Width Modulator Inverter for Renewable Energy Generators. *Energy Procedia*, 2014, vol. 50, pp. 832–840.
9. Dmitrienko V.N., Lukutin B.V. Methods for Estimating Solar Radiation Energy for Photovoltaic Plants. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2017, vol. 328, no. 5, pp. 49–55. (In Russ.).
10. Irwan M., Amelia A.R., Irwanto M., Fareq M., Leow W.Z., Gomesh N., Safwati I. Stand-Alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYST Software. *Energy Procedia*, 2015, vol. 79, pp. 596–603.
11. Kumar N.M., Kumar M.R., Rejoice P.R., Mathew M. Performance Analysis of 100 kWp Grid Connected Si-poly Photovoltaic System Using PVSYST Simulation Tool. *Energy Procedia*, 2017, vol. 117, pp. 180–189.
12. Patel N., Gupta N., Kumar A., Verma A. Multifunctional Grid Interactive Solar Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 2116–2130.
13. Tarigan E., Djuwari, Kartikasari F.D. Techno-Economic Simulation of a Grid-Connected PV System Design as Specifically Applied to Residential in Surabaya, Indonesia. *Energy Procedia*, 2015, vol. 65, pp. 90–99.
14. Yilmaz S., Ozcalik H.R., Kesler S., Dincer F., Yelmen B. The Analysis of Different PV Power Systems for the Determination of Optimal PV Panels and System Installation—A Case Study in Kahramanmaraş, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1015–1024.

Критерии авторства

Торопов А.С. собрал и подготовил исходные данные, выполнил анализ графиков электрической нагрузки и анализ тарифов на электроэнергию для рассматриваемого объекта. Байшев А.В. выбрал оборудование для солнечной электростанции, выполнил расчеты числа и мощности солнечных панелей, провел оценку выработки солнечной электростанции в программе PVSYST, рассчитал сроки окупаемости солнечных электростанций. Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Toropov A.S. collected and prepared the input data, analyzed electrical load plots and electricity rates for the object under consideration. Baishev A.V. chose equipment for a solar power station, calculated the number and power of solar panels, using PVSYST program estimated solar power station production and calculated the payback period for solar power stations. The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Байшев Анатолий Викторович,
Магистрант,
Хакасский государственный университет
им. Н.Ф. Катанова,
655000, г. Абакан, ул. Ленина, 90, Россия;
e-mail: anatoly_bayshev@mail.ru

Торопов Андрей Сергеевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электроэнергетики,
Хакасский технический институт,
филиал Сибирского федерального университета,
655017, г. Абакан, ул. Щетинкина, 27, Россия;
✉ e-mail: andrej_tr@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy V. Baishev,
Master Degree Student,
Khakass State University named
after N.F. Katanov,
90 Lenin St., Abakan 655000, Russia;
e-mail: anatoly_bayshev@mail.ru

Andrey S. Toropov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Electrical Engineering,
Khakass Technical Institute,
Branch of the Siberian Federal University,
27 Shchetinkin St., Abakan 655017, Russia;
✉ e-mail: andrej_tr@mail.ru



Влияние коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на механизм дробления капель различных размеров

© Д.В. Гвоздяков, А.В. Зенков, В.Е. Губин, М.В. Ведяшкин

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Резюме: Цель – представить результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на механизм дробления капель различных размеров. Экспериментальные исследования выполнены на стенде – аэродинамическом имитаторе топки энергетического котла. Для приготовления суспензионного топлива использовался каменный уголь фракции $200 \cdot 10^{-6}$ м и менее. В качестве пластификатора применялся лигносульфонат в количестве 1% от массы угля. Экспериментально определены значения скоростей и размеров капель. Установлены характерные диапазоны скоростей капель в потоке при пневмомеханическом распыле: 0–8 м/с; 8–35 м/с; 35 м/с и более. Рассмотрен диапазон изменения коэффициента поверхностного натяжения от 0,05 до 0,07 Н/м. Проанализированы капли суспензионного топлива размером от 50 до 500 мкм. При обработке результатов не учитывались образующиеся частицы-аэрозоли размером 1 мкм и менее. Определены характерные границы участков некоторых механизмов дробления капель. Теоретически подтверждено влияние коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на процесс разрушения капель. Установлено, что капли размером 50–150 мкм наиболее подвержены вибрационному дроблению. Капли размером 450–500 мкм совершенно не подвержены вибрационному дроблению в процессе пневмомеханического распыла в исследуемой области скоростей. Получены выражения, позволяющие оценить критерий We при давлении суспензии 0,2 МПа и воздуха 0,18 МПа. Представленные результаты экспериментальных и теоретических исследований носят прогностический характер и могут быть использованы при математическом и физическом моделировании процесса распыла суспензионных топлив в топках энергетических котлов с целью оценки аэродинамических характеристик проектируемых и действующих агрегатов.

Ключевые слова: суспензионное топливо, распыл, водоугольное топливо, число Вебера, факел распыла, скорость капли

Благодарности: Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

Информация о статье: Дата поступления 07 марта 2019 г.; дата принятия к печати 11 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е., Ведяшкин М.В. Влияние коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на механизм дробления капель различных размеров. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):775–786. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-775-786

Influence of slurry fuel surface tension coefficient on the mechanism of crushing droplets of various sizes

Dmitry V. Gvozdyakov, Andrey V. Zenkov, Vladimir E. Gubin, Maksim V. Vedyashkin

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract: The purpose is to present the results of experimental and theoretical studies of the influence of the surface tension coefficient of slurry fuel on the mechanism of crushing droplets of different sizes. The experimental studies have been performed on a test bench – an aerodynamic simulator of the energy boiler furnace. The coal of $200 \cdot 10^{-6}$ m fraction or less was used to prepare the slurry fuel. Lignosulfonate in an amount of 1% of the coal weight was used as a plasticizer. The values of velocities and droplet sizes were determined experimentally. The characteristic ranges of droplet velocities in the flow at the rotor spray of 0–8 m/s; 8–35 m/s; 35 m/s or more were identified. The variation range of surface tension coefficient from 0.05 to 0.07 N/m was considered. The analysis was given to slurry fuel droplets with the dimensions from 50 to 500 microns. The processing of results did not take into account the formed aerosol particles with

the size of 1 μm or less. The characteristic boundaries of the sections of some droplet crushing mechanisms were determined. The influence of the surface tension coefficient of the slurry fuel on the process of droplet destruction was theoretically confirmed. It was found out that the droplets of the size of 50-150 microns were most susceptible to vibration crushing. The droplets of the size of 450-500 microns were completely unaffected to vibration crushing during the rotor spray in the studied area of velocities. The expressions have been received allowing to estimate We criterion at the suspension pressure of 0.2 MPa and air pressure of 0.18 MPa. The presented results of experimental and theoretical studies are prognostic and can be used in mathematical and physical modeling of the process of suspension fuel spraying in power boiler furnaces with the purpose of assessing aerodynamic characteristics of designed and operating units.

Keywords: slurry fuel, spray, coal-water fuel, Weber number, spray cone, droplet velocity

Acknowledgements: The work was conducted in the frameworks of the program to improve the competitiveness of Tomsk Polytechnic University.

Information about the article: Received March 07, 2019; accepted for publication July 11, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Gubin V.E., Vedyashkin M.V. Influence of slurry fuel surface tension coefficient on the mechanism of crushing droplets of various sizes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):775–786. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-775-786

1. ВВЕДЕНИЕ

Многие страны мира в настоящее время используют уголь в качестве основного топлива тепловых электрических станций (ТЭС) [1]. Как правило, высококачественные энергетические угли, добываемые в России, экспортируются за рубеж [2]. Доля органического топлива, поступающего на местные станции, составляет порядка 30%, 90% из которых – низкосортные угли [3]. Таким образом, местные ТЭС вынуждены использовать низкокачественные угли [4], потребление которых имеет ряд нерешенных проблем: образование золы и вредных продуктов горения (NO_x и SO_x). Однако развитые страны внедряют перспективные технологии «чистого» сжигания угля [1, 2].

В настоящее время существует ряд технологий, которые обеспечивают снижение выбросов вредных оксидов в окружающую среду. К ним можно отнести низкотемпературный и циркулирующий кипящий слой, высокотемпературный предварительный подогрев угольной пыли, сжигание угля с каталитическими добавками и др. [5–8]. Тем не менее одной из наиболее многообещающих технологий является использование суспензионного топлива [9–11]. Суспензионное топливо может быть представлено в виде смеси воды и мелкодисперсного угля с добавлением пластифика-

тора или без него. Основными параметрами, определяющими данный вид топлива, являются его реологические свойства (вязкость, плотность и седиментационная устойчивость) [12, 13].

В последние годы проведен ряд исследований, направленных на изучение характеристик распыла суспензионного топлива. Большая часть данных работ является экспериментальными [14–18], однако известны и некоторые теоретические исследования [19–21].

Так, в [20] представлены результаты математического моделирования работы форсунки с внутренним смешением. Для этого давление внутри камеры смешения было измерено и рассчитано косвенным и более точным методом с использованием уравнения механической энергии для несжимаемой жидкости. Такая переменная очень важна, т.к. она определяет наличие условия запираания на входе в камеру. В работе продемонстрирован пример, когда поток распыляющей жидкости перекрыт, диаметр выпускного отверстия в смесительную камеру можно оптимизировать. Получен локальный минимум диаметра (по Заутеру) для впускного отверстия размером 5 мм. Для небольших отверстий диаметр частиц (по Заутеру) выше, т.к. максимальной скорости потока газа, которая может проходить через них, недостаточно для образования капель с требуемым диамет-



ром. Также установлено, что минимальное значение диаметра достигается, когда отношение давления жидкости к газу близко к 1, что соответствует оптимальному взаимодействию двух сред внутри смесительной камеры.

В работе [21] представлены результаты математического моделирования распыла суспензионного топлива в целях его газификации. При этом использовалось коммерческое программное обеспечение для гидродинамических вычислений ANSYS/FLUENT. Рассматривалось суспензионное топливо, состоящее из 35% воды и 65% угля. Результаты численного моделирования показали, что распространение факела распыла зависит от расположения внешнего туннеля. Чем дальше он находится от центральной оси, тем больше увеличивается поверхность факела. Также установлено, что на распространение факела распыла в значительной мере влияет скорость подачи топлива и распыляющего агента.

В [19] представлена математическая модель, позволяющая оценить размер каплей суспензионного топлива. Утверждается, что диаметр капель топлива в значительной степени зависит от поверхностного натяжения, плотности среды и относительной скорости движения капель. Также в работе представлены результаты расчетов, выполненные в программе ANSYS/FLUENT, показывающие распределение скорости и температуры в различных сечениях топки и траектории движения частиц.

Целью данной работы являются экспериментальные и теоретические исследования влияния коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на механизм дробления капель различных размеров.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования динамики капель суспензионного топлива в потоке основано на экспериментальных результатах. Стенд для исследования структуры потока распы-

ляемого суспензионного топлива и механизмов дробления капель при различных параметрах представлен на рис. 1. Пневмомеханический распыл топливной суспензии осуществляется при помощи устройства распыла (форсунки) 1 с камерой внутреннего смешения, расположенного в аэродинамическом имитаторе топки котла 2. Исследуемый состав топлива подается при помощи насоса 3 из бака 4 емкостью $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. При проведении эксперимента объем топливной суспензии составляет $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. В качестве распыляющего агента используется воздух, нагнетаемый компрессором 5. Поток распыляемой смеси подсвечивается «ножом», создаваемым лазером 6. Регистрация структуры факела и компонент (капли топлива) осуществляются высокоскоростными кросскорреляционными камерами 7. Диаметр устья сопла форсунки составляет $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, что позволяет исследовать процесс распыла топлив в составе с твердыми компонентами размером до $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

При проведении эксперимента использовался каменный уголь шахты Красноярская (Кемеровской области) фракции $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и менее. В качестве пластификатора применялся лигносульфонат в количестве 1% от массы угля. Исследования выполнены при следующих значениях давления суспензионного топлива и воздуха: 0,2 МПа/0,18 МПа. Давление воздуха устанавливалось на 0,02 МПа меньше с целью исключения «задавливания» воздухом топлива в форсунке по причине значительной вязкости последнего. Камера и лазер расположены на расстоянии 0,5 м от оси факела. В качестве критерия, характеризующего механизм дробления капель в потоке, анализировалось число Вебера (We) в соответствии с [21]:

$$We = \frac{\rho \cdot D \cdot w^2}{\sigma}, \quad (1)$$

где ρ – плотность суспензионного топлива, кг/м^3 ; D – характерный размер (диаметр капли суспензионного топлива), м ; w – скорость капель суспензионного топлива, м/с ; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м .

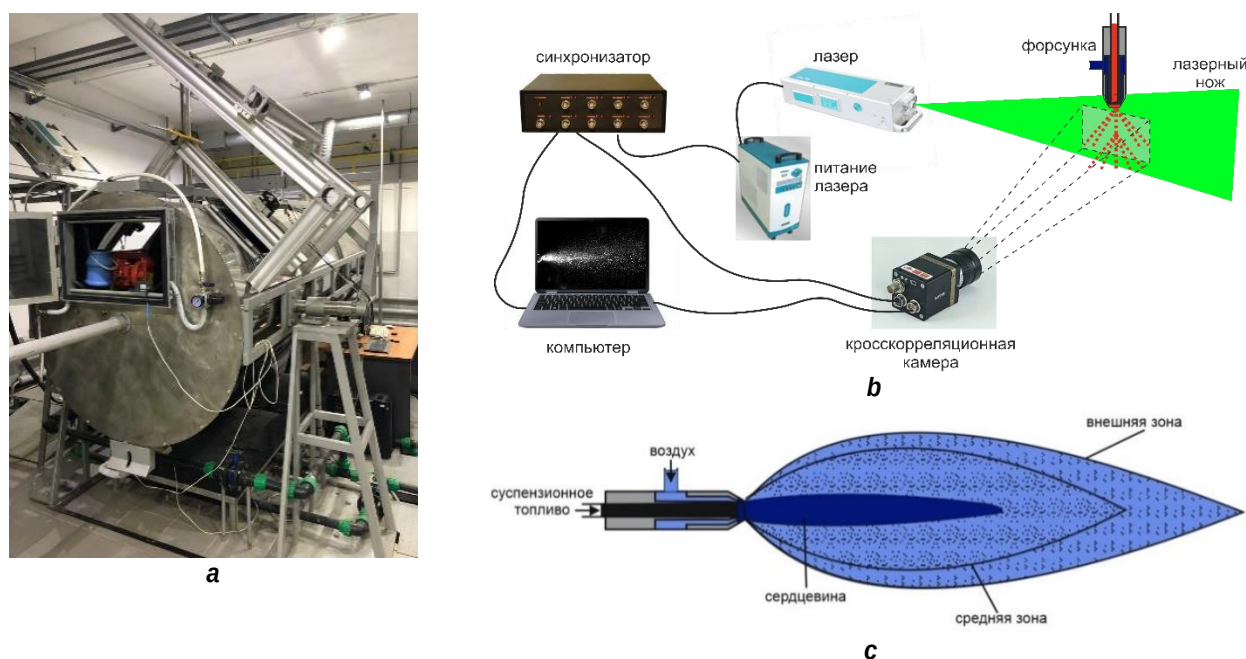


Рис. 1. Экспериментальный стенд: а – общий вид; б – принципиальная схема;
с – область исследования
Fig. 1. Experimental test bench: a – general view; b – schematic diagram; c – research area

Исследования выполнены при следующих условиях и допущениях:

- при оценке числа We не учитывался эффект вращения капель суспензионного топлива в процессе распыла;
- в качестве характерного размера принимался размер капель;
- значения коэффициента поверхностного натяжения суспензии составляли от 0,05 до 0,07 Н/м;
- при проведении эксперимента значение коэффициента поверхностного натяжения суспензии составляло 0,06 Н/м (соотношение вода/уголь – 50/50%);
- не учитывались внешние факторы
- давление и температура внутри аэродинамического имитатора топки (нормальные условия);
- термическая подготовка суспензионного топлива не проводилась;
- цифровая трассерная визуализация осуществлялась при помощи одной кросскорреляционной камеры.

Полученные результаты (размер капель) при распыле суспензионного топлива обработаны в векторном редакторе. Оценка скорости капель осуществлялась при помощи бесконтактного метода измерения

скорости в потоках – PIV (Particle Image Velocimetry) – метод цифровой трассерной визуализации.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические результаты исследований процесса пневмомеханического распыла суспензии проводились при давлениях топлива и воздуха 0,2 МПа/0,18 МПа. Экспериментально определены значения скоростей и размеров капель. Проанализировано влияние коэффициента поверхностного натяжения на значения критерия We . Построены зависимости изменения числа We для капель размером от 50 до 500 мкм, скорости которых изменяются от 8 до 35 м/с. Диапазону скоростей соответствует наибольшее количество частиц в области исследования (ширина 0,17 м, длина 0,17 м). Также проанализировано влияние скорости капель суспензионного топлива от 0 до 35 м/с на We при условии, что с уменьшением размера капель суспензионного топлива в потоке их скорость увеличивается. Последнее установлено по результатам эксперимен-

тальных исследований. Результаты исследований представлены на рис. 2–4.

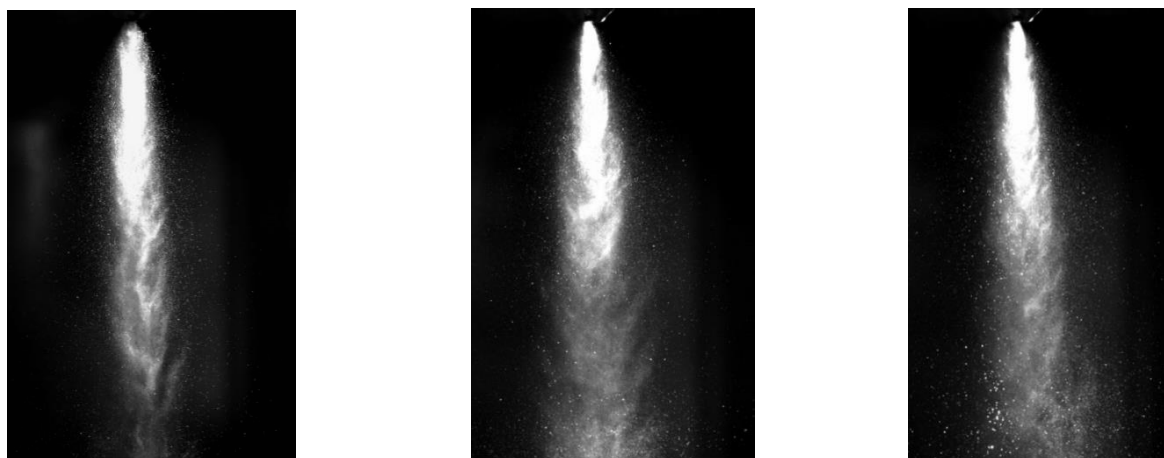
На рис. 2 отражены результаты экспериментов динамики потока суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла. При проведении опыта использовалось суспензионное топливо, коэффициент поверхностного натяжения которого составлял 0,06 Н/м. Представлено три снимка потока, полученных при проведении трех экспериментов, а также выделено три диапазона скорости, характерных для данного эксперимента.

На рис. 2 представлены результаты визуализации эксперимента по распылу суспензионного топлива при давлениях 0,2 МПа/0,18 МПа. Установлено, что наибольшее количество (81,6%) капель обладает скоростью от 0 до 8 м/с. При этом стоит отметить, что в данный диапазон скоростей попадают и аэрозоли, образующиеся в процессе пневмомеханического распыла. На рис. 3 представлены результаты экспериментальных (пунктирная линия) и теоретических исследований в виде зависимостей критерия We от скорости и размеров капель. Кривые построены для диапазона скорости 2. Диапазон скорости 1 не рассматривался.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований динамики капель суспензионного топлива в потоке, скорости которых

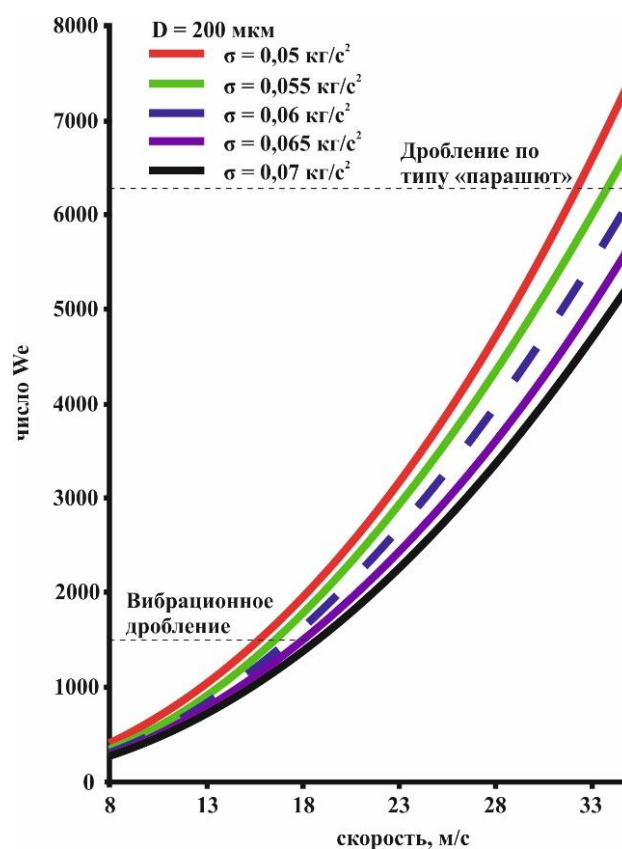
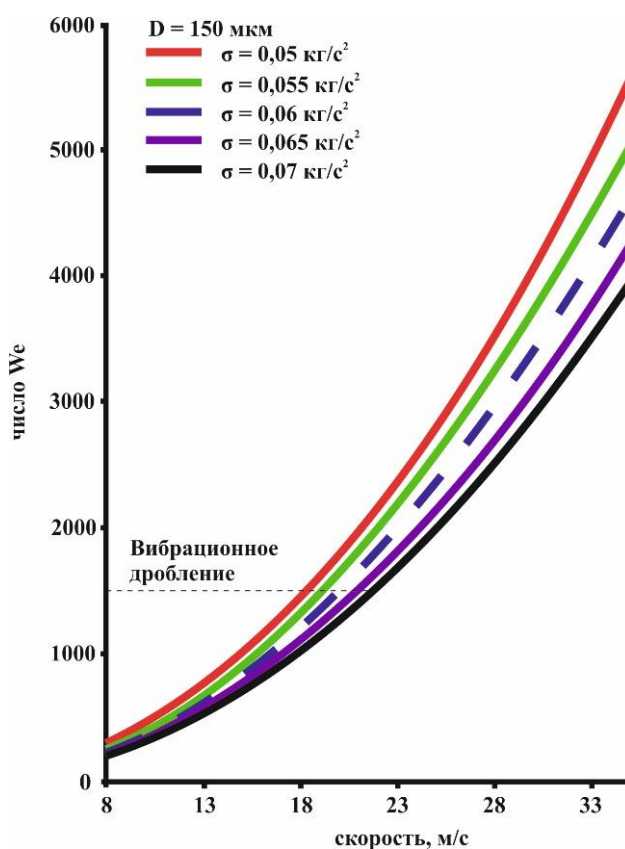
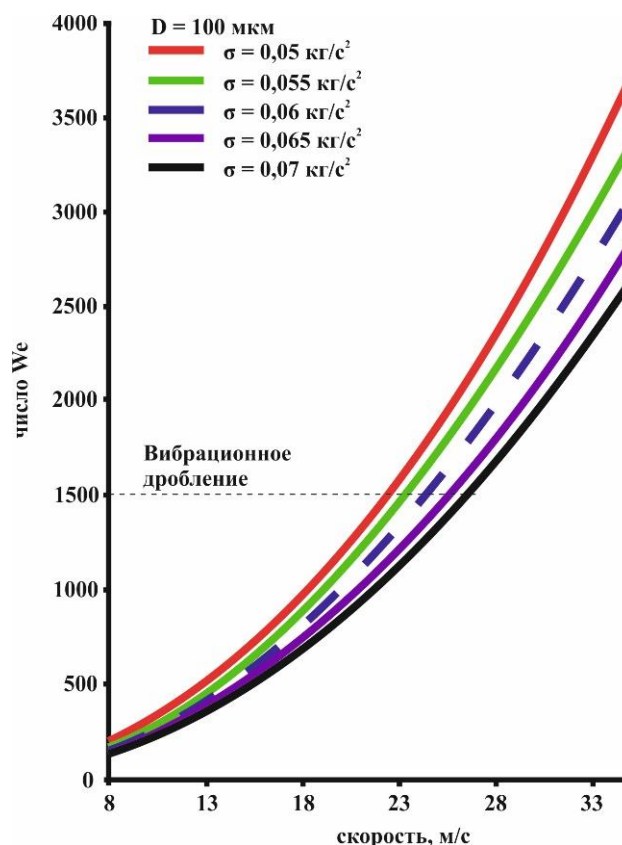
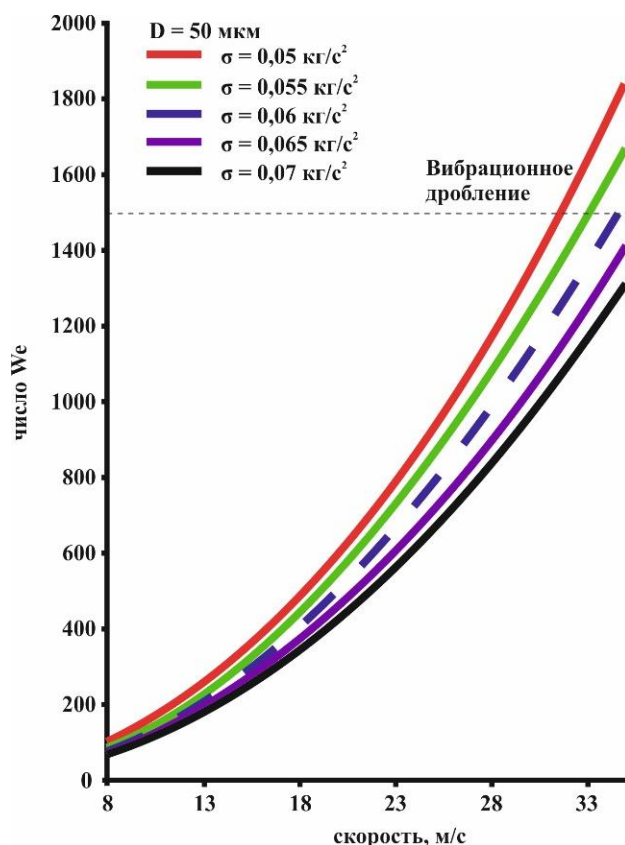
изменяются от 8 до 35 м/с. Проанализировано изменение критерия We при значениях коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива от 0,05 до 0,07 Н/м и размерах капель от 50 до 500 мкм. Результаты экспериментальных исследований на рис. 3 *a–j* выделены пунктирной линией, которой соответствует значение коэффициента поверхностного натяжения 0,06 Н/м. Согласно результатам экспериментальных исследований процесса разрушения капель водоугольного топлива при пневмомеханическом распыле [22], значения и характер критерия We следующие: от 1500 до 6300 – вибрационное дробление; от 6300 до 7800 – дробление по типу «парашют»; от 7800 и более – катастрофическое дробление.

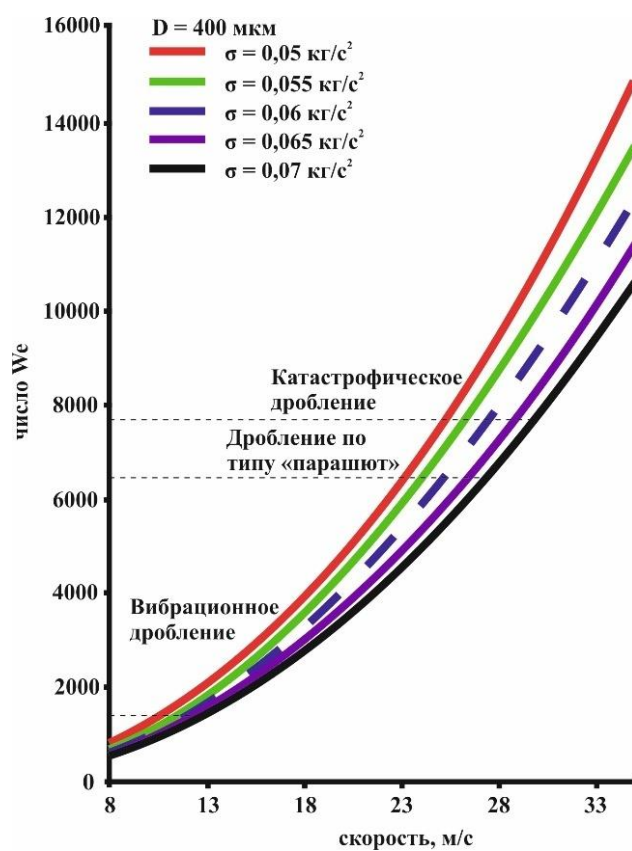
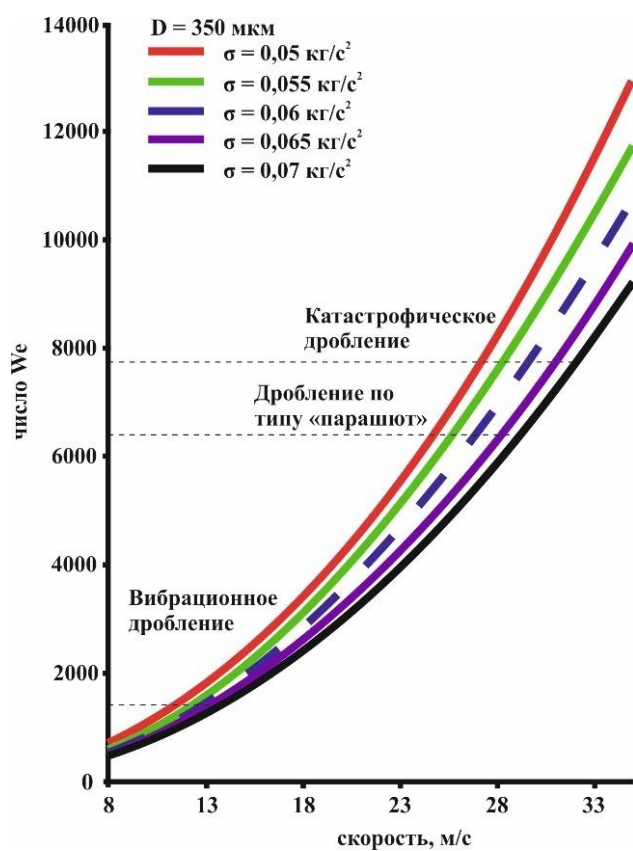
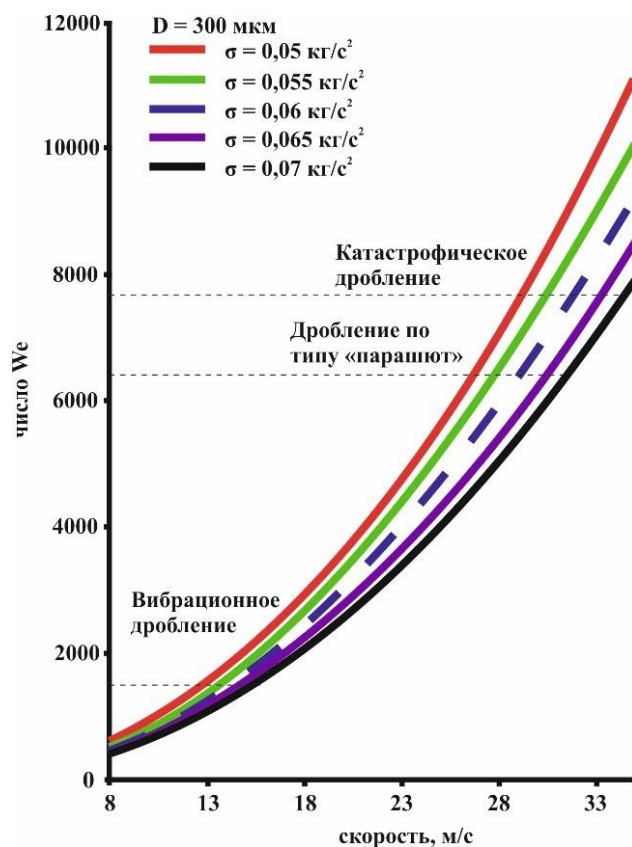
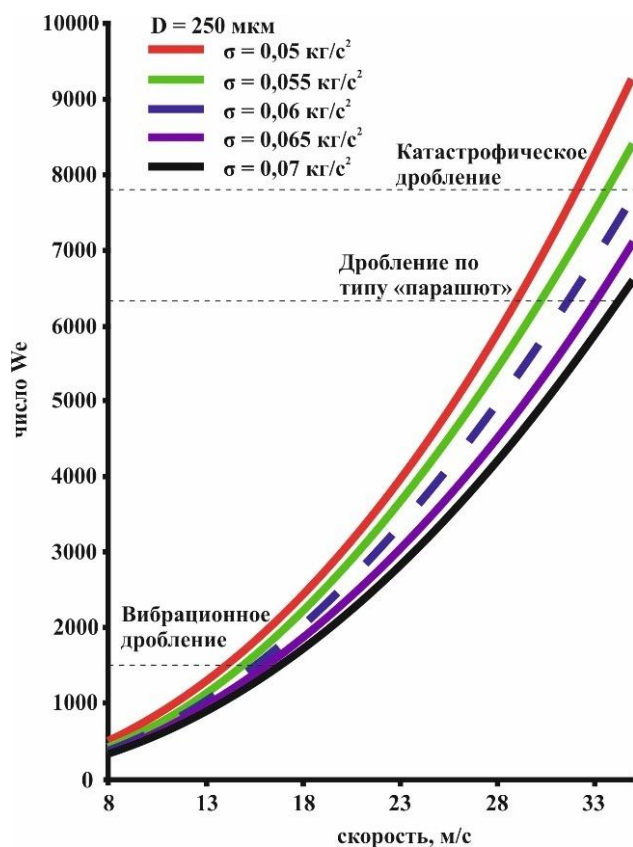
На рис. 3 *a* показаны зависимости, характеризующие изменение числа We для капель размером 50 мкм и значениях коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива от 0,05 до 0,07 Н/м. Установлено, что при скорости 8 м/с значение критерия We изменяется от 68 до 96, а при 35 м/с – от 1313 до 1838. Соответственно, данному диапазону We преимущественно характерно вибрационное дробление капель суспензионных топлив. На рис. 3 *b, d* представлены результаты исследований для капель размером 100–200 мкм. В данном диапазоне размеров при скоростях



Наименование	Минимум	Максимум	%	Количество капель
Диапазон скорости 1	0	8	81,6	70237
Диапазон скорости 2	8	35	17,8	15299
Диапазон скорости 3	35	40,03	0,6	492

Рис. 2. Структура потока суспензионного топлива
Fig. 2. Slurry fuel flow structure





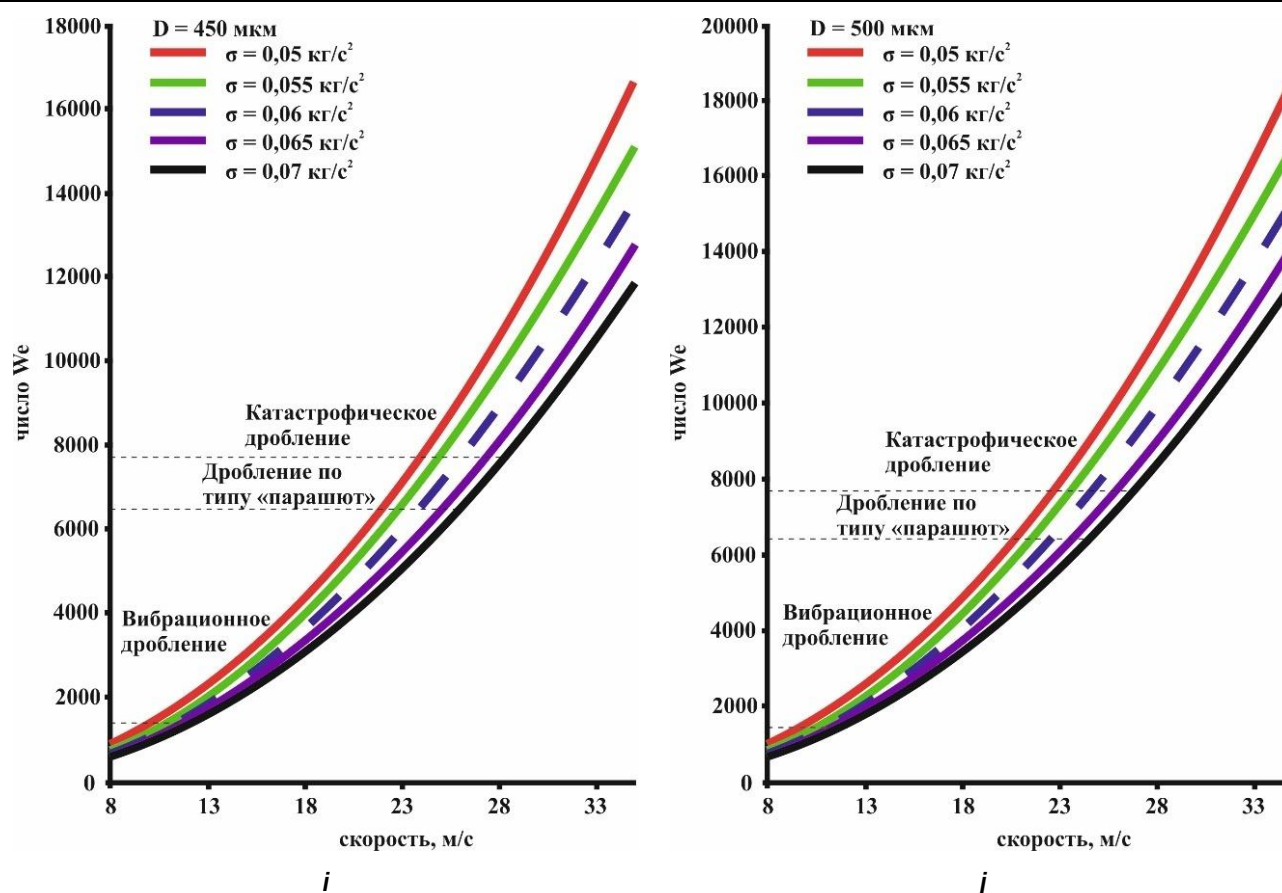


Рис. 3. Зависимость критерия We от скорости и размеров капель
Fig. 3. Dependence of We criterion on velocity and droplet size

8 м/с значение критерия We изменяется от 137 до 350, а при 35 м/с – от 2625 до 7350. Таким образом, капли суспензионного топлива размером от 50 до 200 мкм, коэффициент поверхностного натяжения которых изменяется от 0,05 до 0,07 Н/м, претерпевают преимущественно вибрационное дробление. Но уже при скоростях от 33 м/с и коэффициенте поверхностного натяжения 0,055 Н/м и более наблюдается переход к механизму разрушения капель топливной суспензии по типу «парашют» (рис. 3 d). Области дробления капель представлены на рис. 3 а, d.

При скоростях капель от 29 до 35 м/с и значениях коэффициента поверхностного натяжения от 0,05 до 0,07 Н/м, соответственно, значение числа We составляет 6300 и более (рис. 3 е). Переход к катастрофическому механизму дробления капель суспензионного топлива наблюдается при скоростях от 32 м/с. При этом значение коэффициента поверхностного натя-

жения составляет от 0,05 до 0,055 Н/м (рис. 3 е). Капли размером 300 мкм и со скоростями от 26 до 32 м/с (для всего исследуемого диапазона коэффициента поверхностного натяжения) находятся в условиях разрушения по типу «парашют». Данные условия сохраняются до скоростей 30–35 м/с для капель суспензионного топлива с коэффициентом поверхностного натяжения от 0,05 до 0,065 Н/м (рис. 3 f). При скоростях 30–35 м/с и более (для капель) характерен механизм катастрофического дробления. Следует отметить, что от 25 до 32 м/с и значениях критерия We до 6300 выполняются условия вибрационного разрушения капель суспензионного топлива. Области дробления капель представлены на рис. 3 е, f.

Для капель размером от 350 до 400 мкм (рис. 3 g, h) область вибрационного дробления начинает значительно уменьшаться. Граница порога вибрационного дробления для соответствующих раз-

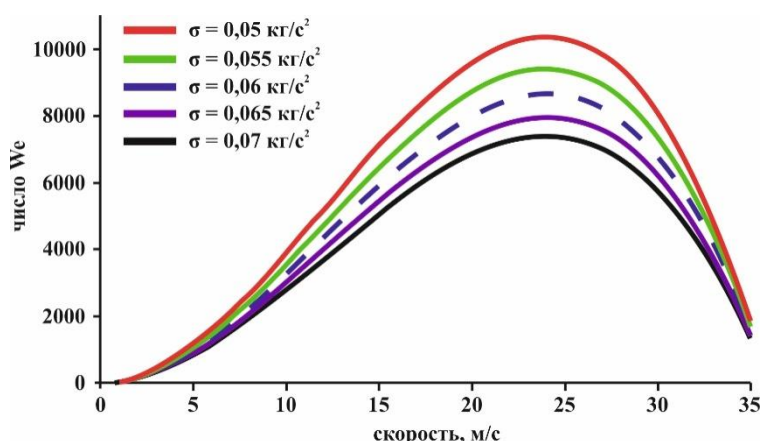
меров капель суспензионного топлива заканчивается при скоростях от 28 до 30 м/с. При этом коэффициент поверхностного натяжения изменяется от 0,055 до 0,07 Н/м (рис. 3 *g, h*). Условия разрушения по типу «парашют» выполняются для капель, обладающих скоростями от 26 м/с и более (рис. 3 *h*), при этом значение коэффициента поверхностного натяжения изменяется в анализируемом диапазоне. Области дробления капель представлены на рис. 3 *g, h*.

Капли размером 450–500 мкм совершенно не подвержены вибрационному дроблению в процессе пневмомеханического распыла в исследуемой области скоростей (рис. 3 *i, j*). Для данного диапазона размера капель суспензионного топлива и их скоростей наиболее характерно два механизма дробления – по типу «парашют» и катастрофическое. Таким образом, можно сделать вывод о том, что капли суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла в диапазоне скоростей от 8 до 35 м/с размером 50–500 мкм с различным значением коэффициента поверхностного натяжения (от 0,05 до 0,07 Н/м) подвергаются трем механизмам разрушения – вибрационное, по типу «парашют» и катастрофическое. При этом (с увеличением размера капель и их скорости) дробление капель проходит две стадии – по типу «парашют» и катастрофическое. Вибрационному дроблению подвержены капли размером преимущественно до 150–200 мкм. Значение коэффициента поверхностного

натяжения также влияет на разрушение капель в процессе пневмомеханического распыла. Области дробления капель представлены на рис. 3 *i, j*.

На рис. 4 представлены зависимости, характеризующие изменение числа We от скорости капель суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла при давлении суспензии 0,2 МПа и воздуха 0,18 МПа. Кривые построены при условии, что каждая капля определенного размера (например, 50 мкм) обладает собственной скоростью. Проанализирован диапазон размера капель от 50 мкм до 500 мкм при скоростях от 0 до 35 м/с при значениях коэффициента поверхностного натяжения 0,05–0,07 Н/м. Результаты экспериментальных исследований соответствуют пунктирной кривой.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в исследуемом диапазоне параметров имеются максимумы значений числа We , изменяющиеся от 7400 до 10360. Данному интервалу значений We чаще всего характерно катастрофическое дробление капель суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла. Также значительным вкладом является значение коэффициента поверхностного натяжения, зависящее от состава суспензионной смеси и соотношения компонент. На рис. 4 представлены выражения для определения расчета числа We при различных значениях коэффициента поверхностного натяжения топливной суспензии.



Выражения для расчета критерия We при различных σ

$$We_{0,05}(w) = -1,5 \cdot w^3 + 54 \cdot w^2$$

$$We_{0,055}(w) = -1,4 \cdot w^3 + 49 \cdot w^2$$

$$We_{0,06}(w) = -1,3 \cdot w^3 + 45 \cdot w^2$$

$$We_{0,065}(w) = -1,2 \cdot w^3 + 42 \cdot w^2$$

$$We_{0,07}(w) = -1,1 \cdot w^3 + 39 \cdot w^2$$

Рис. 4. Изменение числа We и выражения для его определения в зависимости от скорости
Fig. 4. We number variation and expressions for its determination depending on velocity

Полученные выражения позволяют оценить критерий при давлении суспензии 0,2 МПа и воздуха 0,18 МПа.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены экспериментальные и теоретические исследования процесса пневмомеханического распыла суспензии при давлениях топлива и воздуха 0,2 МПа/0,18 МПа. Экспериментально определены значения скоростей и размеров капель. Проанализировано влияние коэффициента поверхностного натяжения на значения критерия We . Построены зависимости изменения числа We для капель размером от 50 до 500 мкм в диапазоне изменения скорости от 8 до 35 м/с. Проанализировано влияние скорости капель суспензии в процессе распыла от 0 до 35 м/с на значение We . Исследования выполнены при условии, что капли суспензионного топлива меньших размеров обла-

дают в потоке большими скоростями. Последнее установлено по результатам экспериментальных исследований. Также опытным путем подтверждено, что скорость капель суспензионного топлива в процессе пневмомеханического распыла изменяется неоднозначно. Таким образом, капля определенного размера, например, 50 мкм, обладает собственной постоянной скоростью в исследуемой области. Полученные выражения, позволяющие оценить критерий We при давлении суспензии 0,2 МПа и воздуха 0,18 МПа, а также представленные результаты экспериментальных и теоретических исследований носят прогностический характер и могут быть использованы при математическом и физическом моделировании процесса распыла суспензионных топлив в топках энергетических котлов с целью оценок аэродинамических характеристик проектируемых и действующих агрегатов.

Библиографический список

1. U.S. Department of Energy. Status of DOE's Clean Coal Program [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energy.gov/fe/articles/status-does-clean-coal-program> (дата обращения: 19.02.2019).
2. Hanjalic K., Krol R, Lekic A. Sustainable Energy Technologies: Options and Prospects. Netherlands: Springer, 2008. 333 p.
3. Мариничева О. Уголь возвращается в генерацию [Электронный ресурс] // Газета «Энергетика и промышленность России». 2012. № 11 (199). URL: <https://www.eprussia.ru/epr/199/14128.htm> (дата обращения: 22.02.2019).
4. Dekterev A.A., Osipov P.V., Chernetskiy M.Y., Ryzhkov A.F. Effect of the rate of pulverized coal preheating on char reactivity // Solid Fuel Chemistry. 2017. № 51 (1). С. 17–23.
5. Делягин Г.Н. Экологически чистое топливо ЭКО-БУТ – путь резкого улучшения экологической ситуации в энергетике России // Экология энергетики 2000: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 18–20 октября 2000 г.). Москва, 2000. С. 320–323.
6. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 4. С. 531–544.
7. Белосельский Б.С. Экология энергетики [Электронный ресурс] // Газета «Энергетика и промышленность России». 2001. № 3 (7). URL: <https://www.eprussia.ru/epr/7/128.htm> (дата обращения: 22.02.2019).
8. Бородуля В.А., Бучилко Э.К., Виноградов Л.М. Некоторые особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из белорусских бурых углей // Теплоэнергетика. 2014. № 7. С. 36–41.
9. Khodakov G.S. Coal-water Suspensions in Power Engineering // Thermal Engineering. 2007. Vol. 54. No. 1. P. 36–47.
10. Саламатин А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России // Уголь. 2000. № 3. С. 10–15.
11. Долинский А.А., Халатов А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе // Промышленная Теплотехника. 2007. Т. 29. № 5. С. 70–79.
12. Сенчуrowa Ю.А., Заречнева Е.В. Математическое моделирование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива в вихревой топке // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 6(94). С. 122–127.
13. Мурко В.И., Федяев В.И., Баранова М.П., Батмунх С.Т., Балдандорж Д.Б., Сухэ-Батор Ч.Б. Технологии получения и сжигания топливных водоугольных суспензий из монгольских бурых углей // Энергетик. 2011. № 4. С. 35–38.
14. Сенчуrowa Ю.А. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 4. С. 37–40.
15. Сенчуrowa Ю.А. Результаты исследований распыления водоугольного топлива // Материалы VI Международной науч.-практ. конф. (г. Кемерово, 15–16 ноября 2005 г.). Кемерово, 2005. С. 152–154.



16. Сенчуrowa Ю.А. Механизм распыления водоугольного топлива // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской науч. конф. молодых ученых: в 3-х ч. (г. Новосибирск, 8–11 декабря 2005 г.). Новосибирск, 2005. Ч. 3. С. 84–86.
17. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И., Засыпкин И.М., Сенчуrowa Ю.А., Риестерер А. Результаты исследований процессов распыления и сжигания суспензионного угольного топлива // Современная наука. 2012. № 1(9). С. 89–96.
18. Zhouhang Li, Yuxin Wu, Hairui Yang, Chunrong Cai, Hai Zhang, Kazuaki Hashiguchi, Keiji Takeno, Junfu Lu. Effect of liquid viscosity on atomization in an internal-mixing twin-fluid atomizer. *Fuel*. 2013, vol. 103, pp. 486–494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.097>
19. Сенчуrowa Ю.А. Модель распыления водоугольного топлива // Энергетическая безопасность России.

- Новые подходы к развитию угольной промышленности: труды VII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Кемерово, 08–11 октября 2005 г.). Кемерово, 2005. С. 93–94.
20. Barroso J., Lozano A., Barreras F., Lincheta E. Analysis and prediction of the spray produced by an internal mixing chamber twin-fluid nozzle. *Fuel Processing Technology*. 2014. Vol. 128. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.06.027>
21. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.
22. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е., Ведяшкин М.В. К вопросу об исследовании структуры потока водоугольного топлива в процессе его пневмомеханического распыла // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2018. Т. 18. № 4. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.14529/power180401>

References

1. U.S. Department of Energy. Status of DOE's Clean Coal Program. Available at: <https://www.energy.gov/fe/articles/status-does-clean-coal-program> (accessed 19 February 2019).
2. Hanjalic K., Krol R, Lekic A. Sustainable Energy Technologies: Options and Prospects. Netherlands: Springer Publ., 2008, 333 p.
3. Marinicheva O. Coal returns to generation. Newspaper "Russian Energy and Industry". 2012, no. 11 (199). Available at: <https://www.eprussia.ru/epr/199/14128.htm> (accessed 22 February 2019).
4. Dekterev A.A., Osipov P.V., Chernetskiy M.Y., Ryzhkov A.F. Effect of the rate of pulverized coal pre-heating on char reactivity. *Solid Fuel Chemistry*, 2017, vol. 51 (1), pp. 17–23.
5. Delyagin G.N. *Ekologicheskii chistoye toplivo EKOVT - put' rezkogo uluchsheniya ekologicheskoy situatsii v energetike Rossii* [Eco-friendly fuel ECOVT is a method of dramatic improvement of environmental situation in Russian power industry]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ekologiya energetiki 2000"* [Proceedings of the international scientific and practical conference "Ecology of Power Engineering 2000", Moscow, 18–20 October 2000]. Moscow, 2000, pp. 320–323. (In Russ.).
6. Salomatov V.V. State and prospects of coal and nuclear power engineering in Russia. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 2009, no. 16 (4), pp. 531–544. (In Russ.).
7. Beloselsky B.S. Power Engineering Ecology. Newspaper "Russian Energy and Industry". 2001, no. 3 (7). Available at: <https://www.eprussia.ru/epr/7/128.htm> (accessed 22 February 2019).
8. Borodulya V.A., Buchilko E.K., Vinogradov L.M. Some features of burning coal-water fuel from Belarusian brown coals in a fluidized bed. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2014, no. 7, pp. 36–41. (In Russ.).
9. Khodakov G.S. Coal-water Suspensions in Power Engineering. *Thermal Engineering*, 2007, vol. 54, no. 1, pp. 36–47.
10. Salamatin A.G. On the state and prospects of using coal-water fuel in Russia. *Ugol' [Coal]*, 2000, no. 3, pp. 10–15. (In Russ.).
11. Dolinsky A.A., Khalatov A.A. *Vodougol'noye toplivo: perspektivy ispol'zovaniya v teploenergetike i zhilishchno-kommunal'nom sektore* [Water-coal fuel: application prospects in power engineering and housing and utilities sector]. *Promyshlennaya Teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2007, vol. 29, no. 5, pp. 70–79. (In Russ.).
12. Senchurova Yu.A., Zarechneva E.V. Mathematical modeling of the process of spraying and burning of water-coal fuel in a vortex furnace. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2012, no. 6(94), pp. 122–127. (In Russ.).
13. Murko V.I., Fedyaev V.I., Baranova M.P., Batmunkh S.T., Baldandorzh D.B., Suhe-Bator Ch.B. Technologies of production and burning of fuel water-coal suspensions from Mongolian brown coal. *Energetik* [Power Engineer], 2011, no. 4, pp. 35–38. (In Russ.).
14. Senchurova Yu.A. Research results of spraying water-coal fuel by pneumomechanical nozzles. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2008, vol. 312, no. 4, pp. 37–40. (In Russ.).
15. Senchurova Yu.A. *Rezultaty issledovaniy raspysleniya vodougol'nogo topliva* [Research results of coal-water fuel spraying]. *Materialy VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, 15–16 November 2005]. Kemerovo, 2005, pp. 152–154. (In Russ.).
16. Senchurova Yu.A. *Mekhanizm raspysleniya vodougol'nogo topliva* [Coal-water fuel spraying mechanism]. *Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh "Nauka. Tekhnologii. Innovatsii"* [Proceedings of All-Russian scientific conference of young scientists "Science. Technology. Innovation", Novosibirsk, 8–11 December, 2005]. Novosibirsk, 2006, part 3, pp. 84–86. (In Russ.).
17. Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Zasyupkin I.M., Senchurova Yu.A., Rie-sterer A. Coal slurry fuels:

combustion and dispersion. *Sovremennaya nauka* [Modern Science], 2012, no. 1 (9), pp. 89–96. (In Russ.).

18. Zhouhang Li, Yuxin Wu, Hairui Yang, Chunrong Cai, Hai Zhang, Kazuaki Hashiguchi, Keiji Takeno, Jun-fu Lu. Effect of liquid viscosity on atomization in an internal-mixing twin-fluid atomizer. *Fuel*. 2013, vol. 103, pp. 486–494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.097>

19. Senchurova Yu.A. Model' raspyleniya vodougol'nogo topliva [Model of coal-water fuel spraying]. *Trudy VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Energeticheskaya bezopasnost' Rossii. Novyye podkhody k razvitiyu ugol'noy promyshlennosti"* [Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference "Energy security of Russia. New approaches to coal industry development", Kemerovo, 08–11

October 2005]. Kemerovo, 2005, pp. 93–94. (In Russ.).
20. Barroso J., Lozano A., Barreras F., Lincheta E. Analysis and prediction of the spray produced by an internal mixing chamber twin-fluid nozzle. *Fuel Processing Technology*. 2014, vol. 128, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.06.027>

21. Galustov V.S. *Pryamotochnyye raspylitel'nyye apparaty v teploenergetike* [Direct-flow spray devices in thermal engineering]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 240 p. (In Russ.).

22. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Gubin V.E., Vedyashkin M.V. On the study of coal-water fuel flow structure during its pneumatic-mechanical atomization. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 5–12. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14529/power180401>

Критерии авторства

Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е., Ведяшкин М.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гвоздяков Дмитрий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова,
Национальный Исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30 а, Россия;
e-mail: dim2003@tpu.ru

Зенков Андрей Викторович,
ассистент Научно-образовательного
центра И.Н. Бутакова,
Национальный Исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30 а, Россия;
✉ e-mail: avz41@tpu.ru

Губин Владимир Евгеньевич,
кандидат технических наук,
доцент Научно-образовательного
центра И.Н. Бутакова,
Национальный Исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30 а, Россия;
e-mail: gubin@tpu.ru

Ведяшкин Максим Викторович,
кандидат технических наук,
доцент Отделения контроля и диагностики,
Национальный Исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30 а, Россия;
e-mail: vedyashkin@tpu.ru

Authorship criteria

Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Gubin V.E., Vedyashkin M.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Gvozdyakov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Butakov
Research and Education Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia;
e-mail: dim2003@tpu.ru

Andrey V. Zenkov,
Assistant Professor of the Butakov Research
and Education Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia;
✉ e-mail: avz41@tpu.ru

Vladimir E. Gubin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Butakov Research
and Education Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia;
e-mail: gubin@tpu.ru

Maksim V. Vedyashkin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Control and
Diagnostics,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russia;
e-mail: vedyashkin@tpu.ru



Разработка и испытания устройства термоэлектрического преобразования

© В.В. Кондратьев, Т.И. Сысоева, Н.Н. Иванов, В.А. Ершов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью работы является создание энергосберегающего устройства, обеспечивающего преобразование тепловой энергии в электрическую. Обзор технических решений в исследуемой области показал возможность использования модулей термоэлектрического преобразования для выработки электроэнергии на производственные нужды. В рамках проведенных исследований создана лабораторная установка и проведены исследовательские испытания модулей термоэлектрического преобразования. Эксперименты выполнялись при различных градиентах температур теплопередающих поверхностей. Была разработана конструкция блока термоэлектрического преобразователя, состоящего из 12 модулей, радиатора охлаждения и коммутационного блока. Проведены опытно-промышленные испытания блока термоэлектрического преобразования в системе газоочистных сооружений алюминиевого завода. Полученные результаты подтверждают, что устройство может обеспечить выработку электроэнергии, достаточную для искусственного освещения промышленной площадки. Авторами предложен вариант компоновки блоков термоэлектрического преобразования для установки газоходных трактов, предназначенных для транспортировки горячих газов или жидкостей. Количество модулей в блоке, их тип и способ электрического соединения могут быть изменены в зависимости от требований выходных энергетических параметров, габаритных размеров газоходов, а также условий эксплуатации и монтажа. Результаты исследований целесообразно использовать в энергетической, нефтегазовой, металлургической и химической отраслях.

Ключевые слова: теплоэнергетика, утилизация тепловой энергии, теплообмен, термоэлектрический преобразователь, газоход, энергосбережение

Информация о статье: Дата поступления 12 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 21 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Кондратьев В.В., Сысоева Т.И., Иванов Н.Н., Ершов В.А. Разработка и испытания устройства термоэлектрического преобразования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):787–796. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-787-796

Development and testing of thermoelectric conversion device

Viktor V. Kondratiev, Tatiana I. Sysoeva, Nikita N. Ivanov, Vladimir A. Ershov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to create an energy-saving device converting thermal energy into electrical energy. A review of technical solutions in the field under study showed the possibility of using thermoelectric conversion modules for electric energy generation for production needs. In the frameworks of the study, a laboratory installation was created and investigation tests of thermoelectric conversion modules were carried out. Experiments were conducted at different temperature gradients of heat-transmitting surfaces. A design of the thermo-electric converter unit consisting of 12 modules, a cooling radiator and a switching unit was developed. Pilot tests of the thermoelectric conversion unit have been conducted in the system of gas treatment facilities of the aluminum plant. The results obtained confirm that the device can provide sufficient power generation for artificial lighting of an industrial site. The authors propose a layout option of thermoelectric conversion units for the installation of gas ducts intended for hot gas or liquid transportation. The number of modules in the unit, their type and method of electrical connection can vary depending on the requirements of output energy parameters, gas duct overall dimensions, as well as operation and installation conditions. The research results can find application in energy, oil and gas, metallurgical and chemical industries.

Keywords: heat power engineering, heat energy recovery, heat exchange, thermoelectric converter, gas duct, energy saving

Information about the article: Received February 12, 2019; accepted for publication June 21, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Kondratiev V.V., Sysoeva T.I., Ivanov N.N., Ershov V.A. Development and testing of thermoelectric conversion device. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):787–796. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-787-796

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время темпы развития крупных городов превышают ранее заложенные: развиваются социальная сфера, жилищное строительство и промышленное производство. В связи с требованиями российского законодательства в сфере эффективного и рационального использования энергетических ресурсов, актуальными являются исследования по совершенствованию арсенала энергоэффективных технологий, обеспечивающих высокую конкурентоспособность производства [1–23].

На многих отечественных промышленных предприятиях технологический процесс связан с выделением значительного количества тепловой энергии, т.н. «сбросное тепло». Одним из самых эффективных решений для утилизации теплоты является применение теплообменных аппаратов. Преимуществом данной технологии представляется рекуперация тепловой энергии, что позволяет добиться повышения эффективности производства за счет нагрева воды на производственные нужды, для отопления, выработки электроэнергии, предварительного нагрева сырья. Обзор технических решений в исследуемой обла-

сти показал, что для утилизации тепловой энергии возможно использовать термоэлектрические преобразователи.

2. ОПИСАНИЕ МОДУЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Модуль термоэлектрического преобразования (ТЭП) представляет собой полупроводниковый генератор, вырабатывающий электрический ток за счет разницы температур на теплопередающих поверхностях. Устройство характеризуется отсутствием движущихся деталей, высокой надежностью, способностью использования теплоты от любых источников тепловой энергии независимо от пространственного положения. На рынке существует большой выбор термоэлектрических преобразователей, изготавливаемых как серийно, так и для решения конкретных задач. Анализ технических характеристик и стоимости модулей показал, что для решения поставленных задач целесообразно использование устройства на основе теллурида висмута (Bi_2Te_3).

На рис. 1 изображен термоэлектрический модуль «классического» исполнения.



Рис. 1. Термоэлектрический модуль термоэлектрического преобразования
Fig. 1. Thermoelectric module of thermoelectric conversion



3. ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Для проведения исследований процессов термоэлектрического преобразования была разработана и сконструирована лабораторная установка, состоящая из следующих комплектующих:

- модуль ТЭП типа TGM-127-1,4-1,2 при параметрах 40x40x3,5 мм, максимальная температура эксплуатации 220°C;
- газоход, выполненный из стальной трубы, сечением 50x50 мм, длиной 700 мм, с толщиной стенок 3 мм;
- технический фен Bosch GHG 660 (температура воздушного потока до 660°C);
- измеритель скорости потока воздуха (анемометр) Testo 410-2;
- восьмиканальный измеритель температуры ОВЕН;
- цифровой мультиметр UTM 1804;
- цифровой термометр;
- комплектующие для радиатора охлаждения ТЭП;
- прочие вспомогательные устройства (узлы крепления системы, электропроводка, система водопитающих и водоотводящих шлангов).

Радиатор охлаждения модуля ТЭП подключался к системе водоснабжения при помощи сантехнической арматуры. Для настройки скорости потока смонтированы терморегулируемые клапаны [1–5].

Для обеспечения хорошего контакта поверхностей термоэлектрических модулей с поверхностями источника места контактов были покрыты теплопроводной кремнийорганической пастой КПТ-8.

Проведение исследований процессов термоэлектрического преобразования производилось в следующей последовательности:

- подача в радиатор холодной воды от источника водоснабжения;
- подача в газоход горячего воздуха от технического фена;
- стабилизация температуры и аэродинамики потока (10 мин);

– фиксирование результатов испытаний в установившемся режиме теплообмена.

Путем корректировки температуры воздушного потока объемом от 250 до 500 л/мин достигалась температура наружной поверхности стенки газохода в диапазоне от 150 до 220°C.

Температуры потока газа, поверхности стенки газохода и радиатора охлаждения измерялись при помощи предварительно установленных термодпар. Обработка данных велась при помощи восьмиканального измерителя температуры ОВЕН УТК38.

Величины напряжения, силы тока и генерируемая мощность модуля ТЭП измерялись при помощи цифрового мультиметра. Результаты исследований процессов термоэлектрического преобразования при различных температурных режимах представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что наилучшие результаты были получены при разнице температур 170°C (200°C горячая сторона и 30°C холодная) между поверхностями термоэлектрического модуля. При этом вырабатываемая мощность модуля ТЭП составила 4,08 Вт.

Худшие показатели наблюдались при разнице температур в 70°C (150°C – горячая сторона и 80°C – холодная) между поверхностями термоэлектрического модуля, при этом вырабатываемая мощность модуля составила 0,75 Вт.

4. ОПИСАНИЕ БЛОКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Авторами работы представлен опытный образец устройства (блок ТЭП), сконструированный на базе модулей ТЭП TGM-127-1,4-1,2. Блок ТЭП состоит из 12 соединенных термоэлектрических модулей, которые устанавливаются на теплоемную панель и фиксируются крепежным устройством к радиатору охлаждения на кремнийорганическую пасту. Радиатор жидкостного охлаждения выполнен из ста-

ли и служит для обеспечения необходимой разницы температур поверхностей. На радиаторе охлаждения располагается блок коммутации, который служит для соединения входных контактов модулей ТЭП. При необходимости термоэлектрические модули между собой могут соединяться параллельно, последовательно или комбиниро-

ванно, в зависимости от требуемых параметров мощности. На блоке коммутации расположены выходные клеммы, предназначенные для подключения приборов энергопотребления [8, 9, 24, 25].

Общий вид и компоненты блока термоэлектрического преобразователя представлены на рис. 2.

Таблица 1

Результаты лабораторных исследований модуля термоэлектрического преобразования типа TGM-127-1,4-1,2

Table 1

Results of laboratory studies of the thermoelectric conversion module of TGM-127-1.4-1.2 type

Температура поверхности стенки газохода, °С	Температура радиатора охлаждения, °С	Напряжение U , В	Сила тока I , А	Мощность W , Вт
150	30	2,4	0,8	1,92
	50	2,2	0,7	1,54
	80	1,5	0,5	0,75
200	30	3,4	1,2	4,08
	50	3,1	1,05	3,25
	80	2,4	0,75	1,8

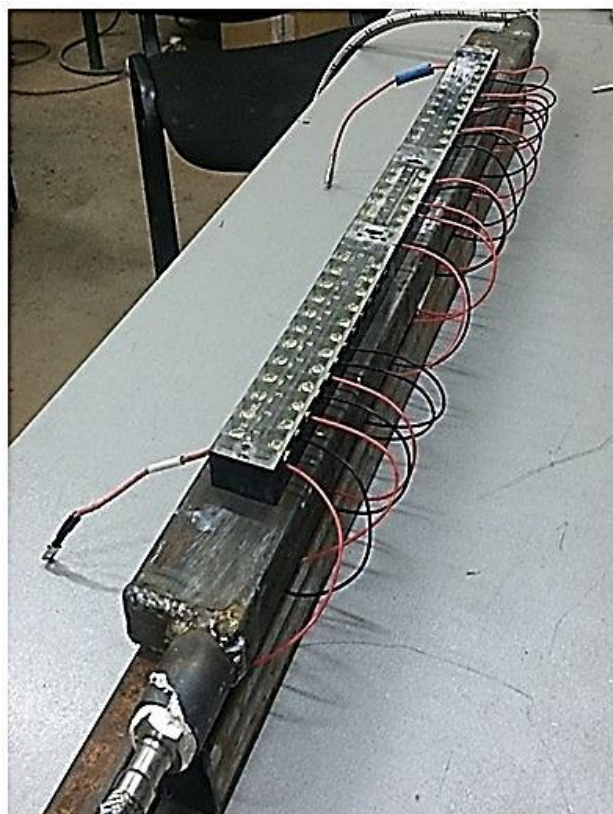
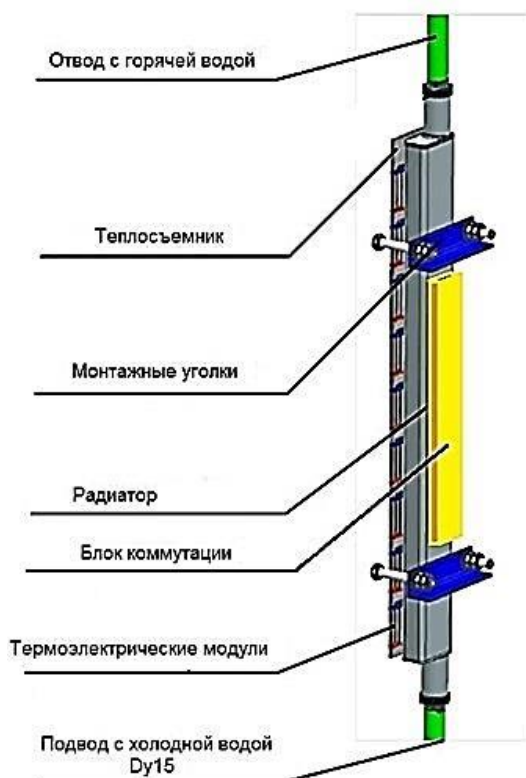


Рис. 2. Блок термоэлектрического преобразования
Fig. 2. Thermoelectric conversion unit

5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ БЛОКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В рамках работы проводились опытно-промышленные испытания блока ТЭП.

Местом осуществления испытаний выбрана система газоочистки корпуса электролиза ООО «РУСАЛ Саяногорск». Алюминиевое производство с использованием мощных электролизеров, работающих на высокой силе тока (300–500 кА), предусматривает отвод в окружающую среду значительного количества тепловой энергии с отходящими анодными газами (10–20% от общего расхода электроэнергии).

Для проведения опытно-промышленных испытаний использовался газопровод круглого сечения диаметром 800 мм. По данным натурных измерений с применением дифференциального манометра с пневмометрической трубкой и цифрового термометра, объем отходящих газов от одного электролизера РА-550 при нормальных условиях составлял $8700 \text{ м}^3/\text{ч}$, а температура газа была 132°C .

Блок ТЭП размещался на участке газопровода в (определенной при помощи теп-

ловизора и цифрового пирометра) зоне максимальных температур. В качестве теплопроводящего слоя между радиатором охлаждения и поверхностью газопровода использовалась термопаста КПТ-8.

Прижимное усилие обеспечивалось применением перфорированной крепежной ленты с возможностью затяжки [10, 12, 17].

Источником водоснабжения служил мобильный пункт подачи прохладной жидкости в радиатор охлаждения блока ТЭП. В качестве резервуара для воды использовалась емкость объемом 125 л с циркуляционным насосом, который крепился к выходному патрубку в нижней части емкости. При помощи гибкой сантехнической подводки емкость соединялась с радиатором охлаждения, образуя замкнутую систему.

В качестве элемента нагрузки блока ТЭП использовался светодиодный светильник Луч-С-64 с напряжением 12 В и потребляемой мощностью 6 Вт.

Значения напряжения и силы тока определялись при помощи цифровых мультиметров, измерение температуры воды осуществлялось при помощи контактной термопары.

Общий вид блока ТЭП, установленного на газопроводе, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид блока термоэлектрического преобразования, установленного на участке газопровода
Fig. 3. General view of the thermoelectric conversion unit installed in the gas duct section

В табл. 2 представлены результаты опытно-промышленных испытаний блока ТЭП, установленного на участке газохода.

Результаты измерений показали, что при создании разницы температур поверхностей около 90°C генерируемая мощность блока ТЭП превышает 8 Вт. Опытно-промышленные испытания подтвердили возможность использования преобразованной тепловой энергии газов в качестве

основного питания для светодиодных светильников ЛУЧ-С-64. Работа светодиодного фонаря, запитанного от блока ТЭП на момент испытаний, представлена на рис. 4.

На основе полученных результатов, авторами исследования разработана конструкция, состоящая из нескольких блоков термоэлектрического преобразования (рис. 5).

Таблица 2

Результаты опытно-промышленных испытаний блока термоэлектрического преобразования

Table 2

Pilot test results of the thermoelectric conversion unit

Параметр	Значение		
	минимальное	максимальное	среднее
Температура стенки газохода, °C	109,0	111,2	110,1
Температура воды, °C	16,4	20,2	18,3
Разница температур, °C	94,8	88,8	91,8
Напряжение, В	13,59	14,83	14,21
Ток, А	0,59	0,63	0,61
Выходная мощность, Вт	8,02	9,34	8,67



Рис. 4. Работа светодиодного фонаря, запитанного от блока термоэлектрического преобразования
Fig. 4. Operation of a LED flashlight powered by a thermoelectric conversion unit

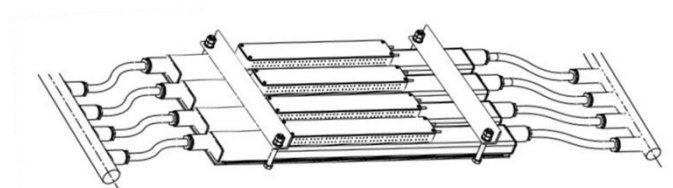


Рис. 5. Конструкция, состоящая из 4 блоков термоэлектрического преобразования
Fig. 5. Design consisting of 4 units of thermoelectric converter

Данное техническое решение позволяет объединять блоки ТЭП между собой для эксплуатации на трубопроводе круглого сечения с различным диаметром (рис. 6).

Количество блоков ТЭП, тип используемых модулей, а также способ их электрического соединения определяются параметрами требуемой мощности, темпера-

турным режимом и габаритными размерами газоходов.

Для монтажа системы из модулей охлаждения используется перфорированная крепежная лента, затяжка которой происходит при помощи болтового соединения, как это представлено на рис. 7.

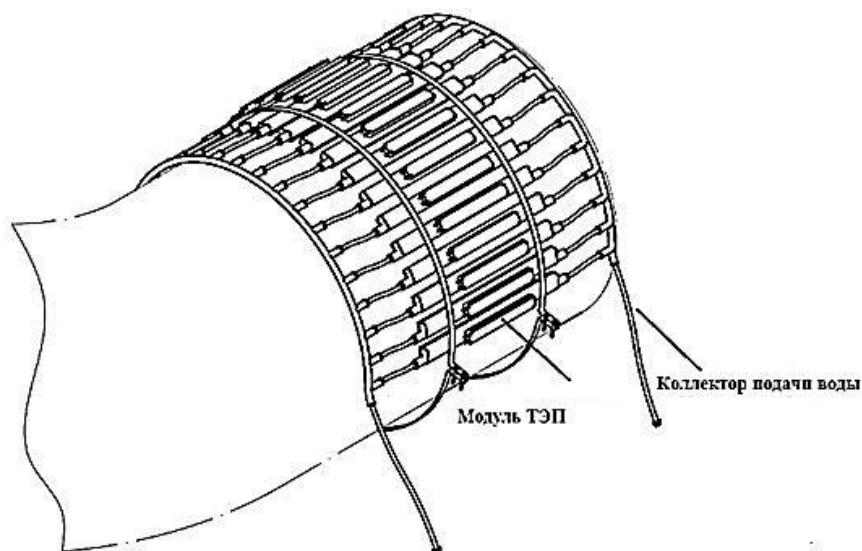


Рис. 6. Вариант компоновки блоков термоэлектрического преобразования на газоходе круглого сечения

Fig. 6. Layout option of thermoelectric converter units on a gas duct of circular cross-section

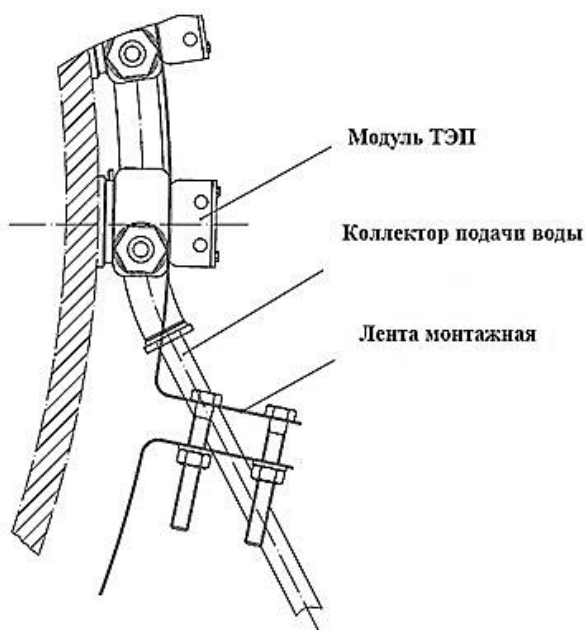


Рис. 7. Способ крепления блоков термоэлектрического преобразования на газоходе круглого сечения

Fig. 7. Mounting method of thermoelectric conversion units on the gas duct of circular cross-section

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытным путем было установлено, что в системах газоходов, где существует достаточное количество тепловой энергии, целесообразным является использование процесса термоэлектрического преобразования. Генерируемая электроэнергия может применяться для технологических нужд, например, освещения или питания электроприборов. При эксплуатации системы, состоящей из 25 блоков ТЭП, опоясывающих окружность газохода с температу-

рой поверхности 90°C и диаметром 800 мм, максимальная генерируемая мощность может составить 300 Вт. Использование LED ламп с потребляемой мощностью 15–20 Вт позволит обеспечить технологические нужды по искусственному освещению производственной площадки.

Таким образом, применение термоэлектрических преобразователей является инновационной технологией и позволит увеличить энергетическую эффективность производства и достичь экономических преимуществ в технологии.

Библиографический список

1. Сысоев И.А., Пинаев А.А., Николаев В.Н. Аппаратурно-технологическая схема и автоматизированный контроль параметров процесса эвакуации газов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016. № 1 (49). С. 98–103.
2. Шамарова Н.А. Теоретические аспекты понятия энергоэффективности // *Инновационная наука*. 2015. № 11-1. С. 186–188.
3. Сысоев И.А. Управление и контроль энергорежима электролизеров для производства алюминия // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 4 (24). С. 84–87.
4. Nozhko S.I. A method for determining the productivity of electrolyzers for aluminum production // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011. Т. 52. No. 1. P. 16–18.
5. Ножко С.И., Блашков А.А. Перспективы повышения мощности алюминиевых электролизеров // *Цветные металлы*. 2012. № 10. С. 65–68.
6. Сысоев И.А., Иванов Н.Н., Зимина Т.И. Разработка способа рекуперации тепла технологических газов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 8 (127). С. 143–150. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-8-143-150>
7. Bouhabila E.H., Cloutier B., Malard T., Martineau P., Vendette H. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center // *Light Metals*. 2012. P. 545–550.
8. Gromard A., Lim Ch., Bouhabila E.H., Cloutie B., Frainais M. Development on electrolytic cell gas cooling // *Light Metals*. 2014. P. 623–628.
9. Bouhabila E.H., Ness E., Kielland V., Kristjansson E., Kristjansson K. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery // *Light Metals*. 2013. P. 793–797.
10. Sorhuus A., Ose S., Nilsen B.M. Possible use of 25 mW thermal energy recovered from the potgas at Alba line 4 // *Light Metals*. 2015. P. 631–636.
11. Куликов Б.П., Буркат В.С., Шахрай С.Г. Способ обезвреживания газов электролитического производства алюминия // Патент на изобретение №2309200. Дата публикации 27.10.2007.
12. Kondratiev V., Govorkov A., Lavrent'eva M., Sysoev I., Karlina A.I. Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11. No. 19. P. 9979–9983.
13. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Колмогорцев И.В., Унагаев Е.И., Зимина Т.И. Оптимизация конструкции теплообменных элементов при проектировании теплообменного устройства // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4 (32). С. 118–124.
14. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Колмогорцев И.В., Зимина Т.И. Разработка теплообменного устройства для рекуперации тепла при производстве алюминия // *Цветные металлы*. 2017. № 7. С. 55–61.
15. Сысоев И.А., Зимина Т.И., Горовой В.О. Результаты испытаний экспериментального теплообменного аппарата при различных режимах работы // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2017. № 3 (55). С. 68–75.
16. Шахрай С.Г., Кондратьев В.В., Белянин А.В., Николаев В.Н., Гронь В.А. Охлаждение анодных газов алюминиевых электролизеров в теплообменниках нагрева глинозема // *Металлург*. 2015. № 2. С. 29–32.
17. Шахрай С.Г., Скуратов А.П., Кондратьев В.В., Ершов В.А. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера // *Цветные металлы*. 2016. № 2. С. 52–56.
18. Ножко С.И., Ворона А.Б., Турусов С.Н., Янко Э.А. Повышение эффективности работы алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом посредством дифференцированной расстановки анодных штырей // *Цветные металлы*. 2010. № 3. С. 62–64.
19. Сысоев И.А., Зимина Т.И., Колмогорцев И.В. Моделирование распределения температур на поверхности теплообменника в пакете прикладной программы ANSYS // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2017. № 2 (54). С. 121–126.
20. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondratiev V.V., Mazurenko V.V., Sheglov E.L. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases // *Metallurgist*. 2017. No. 9-10. P. 973–977.
21. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Горовой В.О., Зимина Т.И., Карлина А.И. Разработка и испытания



опытного образца устройства по преобразованию тепла в электрическую энергию (ТЭП) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 7 (126). С. 132–142. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-132-142>

22. Сысоев И.А., Сысоева Т.И., Иванов Н.Н., Суханов А.С. Экспериментальная модель и результаты исследований процессов термоэлектрического преобразования // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 83–88.

23. Ножко С.И., Сухов О.Ю. Практика увеличения производительности алюминиевых электролизеров второго поколения путем увеличения силы тока //

Цветные металлы. 2013. № 2 (842). С. 63–66.

24. Елкин К.С., Колосов А.Д., Небогин С.А. Применение установок продольно-емкостной компенсации для повышения коэффициента полезной мощности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 1 (57). С. 23–30. DOI: 10.26731/1813-9108

25. Шахрай С.Г., Ржечицкий Э.П., Горовой В.О. Исследование параметров технологических процессов и анализ производительности оборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 84–88.

References

1. Sysoev I.A., Pinaev A.A., Nikolaev V.N. Process flow diagrams and automated control of parameters of the process of evacuation of gases. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2016, no. 1 (49), pp. 98–103. (In Russ.).
2. Shamarova N.A. Theoretical aspects of the concept of energy efficiency. *Innovacionnaya nauka* [Innovation science], 2015, no. 11-1, pp. 186–188. (In Russ.).
3. Sysoev I.A. Power level management and control for electrolyzers in aluminium production. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 4 (24), pp. 84–87. (In Russ.).
4. Nozhko S.I. A method for determining the productivity of electrolyzers for aluminum production // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2011, vol. 52, no. 1, pp. 16–18.
5. Nozhko S.I., Blashkov A.A. Prospects for increasing the power of aluminum reduction cells. *Cvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2012, no. 10, pp. 65–68. (In Russ.).
6. Sysoev I.A., Ivanov N.N., Zimina T.I. Development of technological gas heat recovery method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 8 (127), pp. 143–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-8-143-150>
7. Bouhabila E.H., Cloutier B., Malard T., Martineau P., Vendette H. Electrolytic cell gas cooling upstream of treatment center. *Light Metals*, 2012, pp. 545–550.
8. Gromard A., Lim Ch., Bouhabila E.H., Cloutie B., Frainais M. Development on electrolytic cell gas cooling. *Light Metals*, 2014, pp. 623–628.
9. Bouhabila E.H., Ness E., Kielland V., Kristjansson E., Kristjansson K. An innovative compact heat exchanger solution for aluminum off-gas cooling and heat recovery. *Light Metals*, 2013, pp. 793–797.
10. Sorhuus A., Ose S., Nilsen B.M. Possible use of 25 mW thermal energy recovered from the potgas at Alba line. *Light Metals*, 2015, pp. 631–636.
11. Kulikov B.P., Burkat V.S., Shakhrai S.G. The method of neutralizing gases from the electrolytic production of aluminum. Patent for the invention No. 2309200 of 27 October 2007. (In Russ.).
12. Kondratiev V., Govorkov A., Lavrent'eva M., Sysoev I., Karlina A.I. Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU. *International Journal of*

Applied Engineering Research, 2016, vol. 11, no. 19, pp. 9979–9983.

13. Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V., Kolmogorcev I.V., Unagaev E.I., Zimina T.I. Optimization of heat-exchange element construction when developing heat-exchanger. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2016, no. 4 (32), pp. 118–124. (In Russ.).

14. Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V., Kolmogorcev I.V., Zimina T.I. Development of heat exchanger for heat recovery in aluminum production. *Cvetnye metally*, 2017, no. 7, pp. 55–61. (In Russ.).

15. Sysoev I.A., Zimina T.I., Gorovoj V.O. Heat exchanger testing results under different operation modes. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2017, no. 3 (55), pp. 68–75. (In Russ.).

16. Shahraj S.G., Kondrat'ev V.V., Belyanin A.V., Nikolaev V.N., Gron' V.A. Cooling of anode gases of aluminium electrolytic cells in heat exchangers of alumina heating, *Metallurg* [Metallurgist], 2015, no. 2, pp. 29–32. (In Russ.).

17. Shahraj S.G., Skuratov A.P., Kondrat'ev V.V., Ershov V.A. Heat recovery of aluminum electrolysis cell anode gases. *Cvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2016, no. 2, pp. 52–56. (In Russ.).

18. Nozhko S.I., Vorona A.B., Turusov S.N., Yanko E.A. Investigation of Gibbsite structure with various dispersion degree. *Cvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2010, no. 3, pp. 62–64. (In Russ.).

19. Sysoev I.A., Zimina T.I., Kolmogorcev I.V. Modeling of the temperature distribution on the surface of the heat exchanger in the package of applied program AN-SYS. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, no. 2 (54), pp. 121–126. (In Russ.).

20. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondratiev V.V., Mazurenko V.V., Sheglov E.L. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases. *Metallurgist*, 2017, no. 9-10, pp. 973–977. (In Russ.).

21. Sysoev I.A., Kondrat'ev V.V., Gorovoj V.O., Zimina T.I., Karlina A.I. Development and testing of a prototype device for converting heat into electrical energy (HEE). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 7 (126), pp. 132–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-132-142>

22. Sysoev I.A., Sysoeva T.I., Ivanov N.N., Suhanov A.S. Experimental model and results of studies of thermoelectric conversion processes. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technology], 2018, no. 2 (38), pp. 83–88. (In Russ.).
23. Nozhko S.I., Suhov O.Yu. The practice of improving second-generation aluminum electrolyzer performance by increasing current strength. *Cvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2013, no. 2 (842), pp. 63–66. (In Russ.).
24. Elkin K.S., Kolosov A.D., Nebogin S.A. The applica-

- tion of the series capacitive compensation to increase the useful power ratio. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2018, no. 1 (57), pp. 23–30. (In Russ.). DOI: 10.26731/1813-9108
25. Shahraj S.G., Rzechickij E.P., Gorovoj V.O. Study of parameters of technological processes, and equipment performance evaluation. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2016, no. 3 (51), pp. 84–88. (In Russ.).

Критерии авторства

Кондратьев В.В., Сысоева Т.И., Иванов Н.Н., Ершов В.А. провели разработку и испытания устройства термоэлектрического преобразования и заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кондратьев Виктор Викторович,

кандидат технических наук,
руководитель инновационно-технологического центра,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: kvv@istu.edu

Сысоева Татьяна Игоревна,

инженер научно-исследовательской части,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: ziminati@istu.edu

Иванов Никита Николаевич,

инженер научно-исследовательской части,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: crist2003@mail.ru

Ершов Владимир Александрович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизации
производственных процессов,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: ershov@istu.edu

Authorship criteria

Kondratiev V.V., Sysoeva, T.I., Ivanov N.N., Ershov V.A. developed and tested a thermoelectric conversion device. They declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Kondratiev,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Innovation and Technology Center,
Irkutsk National Research University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: kvv@istu.edu

Tatiana I. Sysoeva,

Engineer of the Research Department,
Irkutsk National Research University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: ziminati@istu.edu

Nikita N. Ivanov,

Engineer of the Research Department,
Irkutsk National Research University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: crist2003@mail.ru

Vladimir A. Ershov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Automation of Industrial Processes,
Irkutsk National Research University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: ershov@istu.edu



Оригинальная статья / Original article

УДК 666.1.031.84

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-797-804>

Моделирование котельного агрегата по каналу «температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства – расход дымовых газов»

© В.Г. Хапусов, А.А. Подкорытов, А.А. Ермаков

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – разработать модели, позволяющие учитывать динамику объекта. Динамические модели позволяют точнее прогнозировать и управлять процессом по сравнению с классическими системами автоматического управления. Данное исследование относится к усовершенствованию методов управления газоздушным трактом котельного агрегата в процессе производства пара. В статье рассматривается применение известной методики Д.Ж. Бокса и Г. Дженкинса для идентификации процесса производства пара. В качестве объекта исследования выбран котельный агрегат, который является очень сложной и взаимосвязанной системой, описанной как динамический стохастический объект с неконтролируемыми возмущающими воздействиями. Экспериментально-статистическими методами получена математическая модель, позволяющая определить степень влияния температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства барабанного котла на расход дымовых газов. В результате проведенных исследований получены модели, позволяющие оценить влияние температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с левой и правой сторон на расход дымовых газов котельного агрегата.

Ключевые слова: топочное устройство, расход пара, температура уходящих газов, стохастическая модель, идентификация, оценивание, диагностическая проверка

Информация о статье: Дата поступления 15 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 27 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Хапусов В.Г., Подкорытов А.А., Ермаков А.А. Моделирование котельного агрегата по каналу «температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства – расход дымовых газов». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):797–804. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-797-804

Boiler unit modeling by the channel “flue gas temperature in the furnace rotary chamber– flue gas flow”

Vladimir G. Khapusov, Aleksei A. Podkorytov, Andrei A. Ermakov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study is to develop the models that take into account the dynamics of the object. Dynamic models provide more accurate prediction and control of the process as compared with classical automatic control systems. This study deals with the improvement of the control methods of the air-gas path of a boiler unit under steam production. The article considers the application of the well-known method of G. Box and G. Jenkins for steam production process identification. The subject of investigation is a boiler unit that is a very complex and interconnected system described as a dynamic stochastic object with uncontrolled perturbation influences. Using experimental and statistical methods a mathematical model has been obtained that allows the determination of the influence degree of the flue gas temperature in the furnace rotary chamber of the drum boiler on the flue gas flow. The conducted researches resulted in obtaining the models allowing to evaluate the effect of the temperature of the flue gases in the furnace rotary chamber on the left and right sides of the flue gas flow of the boiler unit.

Keywords: furnace unit, steam consumption, flue gas temperature, stochastic model, identification, estimation, diagnostic test

Information about the article: Received February 15, 2019; accepted for publication June 27, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Khapusov V.G., Podkorytov A.A., Ermakov A.A. Boiler unit modeling by the channel “flue gas temperature in the furnace rotary chamber– flue gas flow”. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):797–804. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-797-804

1. ВВЕДЕНИЕ

В качестве объекта исследования был выбран котельный агрегат БКЗ-420-140-6, оборудованный дымососами ДС-А и ДС-Б. Для стабилизации расхода дымовых газов требуется изучить степень влияния на расход газов температуры уходящих газов в топочной камере. Высота дымовой трубы котельного агрегата определяется необходимой тягой и санитарными требованиями к выбросу продуктов сгорания¹.

Если тяга, которую создает дымовая труба, недостаточна для преодоления газового сопротивления котла, то используют искусственную тягу. Регулирование искусственной тяги осуществляется с помощью осевого направляющего аппарата дымососа².

В данной статье исследуется зависимость расхода уходящих газов от температуры дымовых газов в поворотной камере топки. Температура в поворотной камере является дополнительным возмущающим фактором, позволяющим обеспечить более точное регулирование дымососов³. Косвенным параметром, характеризующим расход дымовых газов, принят ток, потребляемый дымососами ДВ-А и ДВ-Б. Топочная камера (как объект управления) представляет собой весьма сложную и взаимосвязанную систему [4]. Ее можно характеризовать как динамический стохастический объект с неизменяемыми возмущающими воздействиями.

2. ЗАВИСИМОСТЬ РАСХОДА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В ПОВОРОТНОЙ КАМЕРЕ ТОПКИ

Построить математическую модель процесса на основании известных физико-химических закономерностей в настоящее

время не представляется возможным. Данные, собранные в течение длительного времени наблюдений за нормальным ходом процесса выработки пара, были подвергнуты статистическому анализу. В период пассивного эксперимента контролировались следующие технологические факторы (количество наблюдений $N = 1800$ с интервалом 10 с): $T_{лев}$ – температура уходящих газов в поворотной камере с левой стороны; $T_{пр}$ – температура уходящих газов в поворотной камере с правой стороны; I_a – ток, потребляемый дымососом ДС-А; I_b – ток, потребляемый дымососом ДС-Б. Испытания велись в течение смены с интервалом 10 с.

Для исследования влияния температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства на рабочий ток дымососов ($I_a + I_b$) были использованы методы корреляционного и регрессионного анализов [5].

Исходной информацией для этого послужили временные ряды:

- сумма рабочих токов дымососов ($I_a + I_b$) – $Y^{2,t}$;

- температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с правой стороны – $X^{1,t}$;

- температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с левой стороны – $X^{2,t}$.

В качестве примера (рис. 1) приведены временные ряды: сумма рабочих токов дымососов ДС-А, ДС-Б ($Y^{2,t}$) и температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства слева $T_{лев}$ ($X^{2,t}$) в стандартизированном виде.

С целью приведения указанных выше временных рядов к стационарному виду, согласно методике [5], для каждого ряда были получены разностные временные ря-

¹Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник. 4-е изд. М.: Изд. Дом МЭИ, 2007. 352 с. / Pletnev G.P. Automation of technological processes and production in heat energy sector: a textbook. 4th edition. M.: House of MPEI Publ., 2007, 352 p.

²Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник. М.: Изд. Дом МЭИ, 2005. 400 с. / Rotach V.Ya. Theory of automatic control: textbook. Moscow: House of MPEI Publ., 2005, 400 p.

³Волошенко А.В. Принципиальные схемы паровых котлов и топливоподачи: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 100 с. / Voloshenko A.V. Schematic diagrams of steam boilers and fuel supply: Learning aids. Tomsk: TPU Publishing House, 2011, 100 p.

ды с помощью оператора взятия разностей:

$$x_t = \nabla^d X_t; y_t = \nabla^d Y_t \text{ при } d > 0,$$

где d – порядок разности; x_t, y_t – нормированные значения временных рядов:

$$x_t = (X_t - \bar{X}_t) / \sigma_x, y_t = (Y_t - \bar{Y}_t) / \sigma_y,$$

в которых

$\bar{X}_t, \bar{Y}_t$ – средние значения ряда, σ_x, σ_y – среднее квадратичное отклонение.

Модели временных рядов рабочего тока дымососа и температуры уходящих газов в поворотной камере приведены в [5].

Оказалось, что уже при $d = 1$ исследуемые разностные временные ряды имеют быстро затухающую автокорреляционную функцию.

Приведение рядов к стационарному

виду позволяет использовать метод взаимных корреляционных функций для определения в структуре модели таких времен запыляваний⁴, для которых коэффициенты связи между расходом дымовых газов и температурой уходящих газов в поворотной камере значимы [7].

В качестве примера на рис. 2 приведен график взаимно-корреляционной функции $R_{xy}(k)$ между наблюдаемыми рядами $Y^{1,t}$ (суммы рабочих токов дымососов ДС-А, ДС-Б) и рядом $X^{2,t}$ (температурой уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с левой стороны), полученными в результате обработки статистических данных.

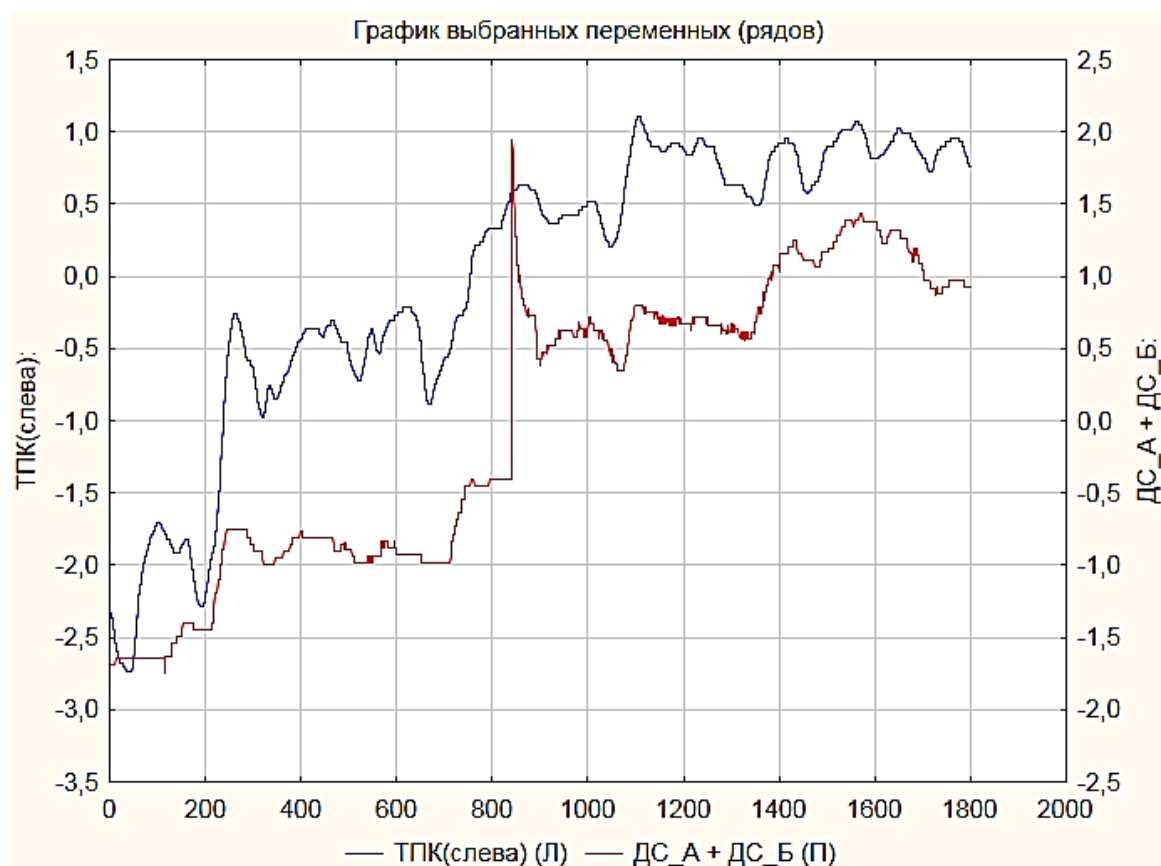


Рис. 1. Временные ряды: сумма рабочих токов дымососов ДС-А, ДС-Б и температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства слева ($T_{лв}$)
Fig. 1. Time series: sum of the operating currents of the induced draft fans ДС-А, ДС-Б and flue gas temperature in the furnace rotary chamber on the left ($T_{лв}$)

⁴Хапусов В.Г. Моделирование систем: учеб. пособ. Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2007. 212 с. / Khapusov V.G. System modeling: Learning aids. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2007, 212 p.

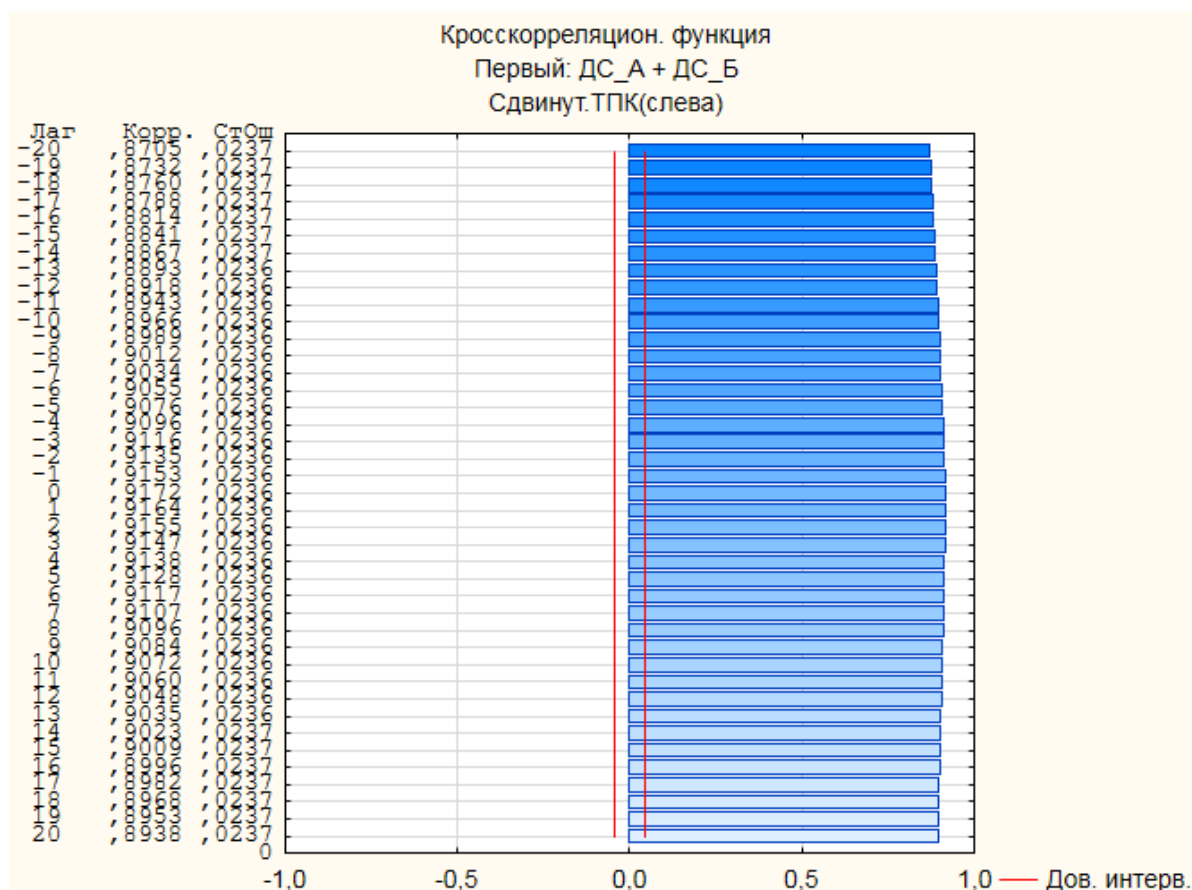


Рис. 2. Выборочная взаимная корреляционная функция $R_{x,y}(k)$ по наблюдаемым данным
Fig. 2. Sample cross-correlation function $R_{x,y}(k)$ from the observed data

Визуальный анализ этого графика не позволяет сделать однозначного вывода о тех временных интервалах, при которых температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с левой стороны существенно влияет на расход дымовых газов, т.к. механизм взаимодействия завуалирован коррелированностью значений входного ряда, но помогает определить значимость коэффициентов взаимной корреляции⁵.

Для устранения эффекта коррелированности предлагается к входному и выходному рядам применить дополнительную процедуру выравнивания «выбеливания» на основе построения для них моделей авторегрессии и скользящего среднего (АРСС) [9]:

$$\alpha_t = x_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i x_{t-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_{t-j} \alpha_{t-j};$$

$$\beta_t = y_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_{t-j} \beta_{t-j}.$$

где α_t , β_t – выравненные ряды, соответственно, для входных и выходных разностных рядов; Φ_i – значение параметров для авторегрессионной модели; Θ_{t-j} – значения параметров для модели скользящего среднего; p – порядок модели авторегрессии; q – порядок модели скользящего среднего.

Для получения оценок p , q , Φ_i был применен нелинейный алгоритм наименьших квадратов².

В табл. 1 приведены выборочные взаимные корреляционные функции $r_{\alpha\beta}(k)$ после предварительного выравнивания спектра, там же даны приближенные стандартные ошибки выборочной взаимной корреляции $\sigma(r)$.

⁵Аракелян Э.К., Пикина Г.А. Оптимизация и оптимальное управление: учеб. пособ. М.: Изд-во МЭИ, 2007. 408 с. / Arakelyan E.K., Pikina G.A. Optimization and optimal control: Learning aids. M.: MEI Publ., 2007, 408 p.



Таблица 1

Выборочная взаимная корреляционная функция после выравнивания спектра

Table 1

Selective cross-correlation function after spectrum equalization

Вход	Вы- ход	Сдвиг k	Коэффициент взаимной корреляции $r_{\alpha\beta}(k)$						Ошибка $\sigma(r)$
$T_{лев}$	(I_a+I_b)	0–5	0,045	0,029	0,029	0,083	0,029	0,079	0,024
		6–11	0,029	0,022	0,026	0,066	0,025	0,024	
		12–17	0,025	0,059	0,018	0,057	–	–	
$T_{пр}$		0–5	0,0706	0,041	0,0309	0,029	0,025	0,022	
		6–11	0,0287	0,074	0,0230	0,0347	0,062	0,0186	
		12–17	0,023	0,0203	0,0035	0,049	–	–	

Сравнение коэффициентов взаимной корреляции с их стандартными ошибками $\sigma(r)$ показывает, что температура уходящих газов в поворотной камере слева и справа тесно связана со значениями рабочего тока дымососов в диапазоне 0–150 с.

При построении моделей, характеризующих зависимость влияния температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства на расход дымовых, высказывается предположение, что структура моделей относится к классу линейных и, следовательно, может быть использован принцип суперпозиции⁶.

Привязка модели к наблюдаемым значениям временных рядов осуществляется в несколько этапов: сначала делается пробная идентификация на основе анализа приближенной функции отклика на единичный импульс, затем применяется процедура нелинейного оценивания пробной модели и диагностическая проверка с использованием критерия согласия χ^2 .

Динамические стохастические модели влияния температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с левой стороны на расход дымовых газов котельного агрегата были получены с использованием методики Бокса-Дженкинса в классе моделей $y_t = \delta^{-1}(B)_\omega(B) \cdot x_{t-b} + n_t$,

где B – оператор сдвига назад на один шаг, b – параметр запаздывания [11],

$$\delta(B) = 1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r;$$

$$\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2 - \dots - \omega_s B^s.$$

С целью получения более точной модели в уравнениях была учтена шумовая составляющая n_t , которая описывалась в классе модели авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) $n_t = y_t - y_t^*$, где y_t – наблюдаемый временной ряд; y_t^* – значения ряда, получаемые по модели; $n_t = \Phi^{-1}(B) \cdot \Theta(B) a_s$, где a_s – остаточная ошибка [12].

Динамические стохастические модели, полученные, соответственно, для температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с правой и левой сторон, определяются некоторыми условиями.

Зависимость расхода дымовых газов от температуры в поворотной камере с правой стороны топки:

$$(1 + 0,0466 B + 0,053 B^2) \nabla (I_a + I_b) =$$

$$\begin{matrix} \pm 0,023 & \pm 0,024 \end{matrix}$$

$$= (0,218) \nabla T_{пр} (t - 0) +$$

$$\pm 0,072$$

⁶Сивохин А.В., Мещеряков Б.К. Решение задач оптимального управления с использованием математической системы MATLAB и пакета имитационного моделирования SIMULINK: лабораторный практикум. Пенза: Изд-во ПГУ, 2006. 263 с. / Sivokhin A.V., Meshcheryakov B.K. Solution of optimal control problems using the MATLAB mathematical system and the SIMULINK package: Laboratory course. Penza: PGU Publishing House, 2006, 263 p.

Таблица 2

Значения коэффициентов χ^2 статистики

Table 2

Values of χ^2 statistics coefficients

Вход	Выход	Число степеней свободы	H	Число степеней свободы	Q
$T_{лв}$	$(I_a + I_6)$	30	14,4	15	14,56
$T_{пр}$	$(I_a + I_6)$	30	21,6	15	14,38

$$+ (0,148 \pm 0,072) \nabla T_{пр} (t - 7) + n_t,$$

значение шума описывается моделью $n_t = a_t$.

Зависимость расхода дымовых газов от температуры в поворотной камере с левой стороны топки:

$$(1 + 0,0466 \pm 0,023 \nabla + 0,053 \pm 0,024 \nabla^2) (I_a + I_6) = (0,29 \pm 0,086) \nabla T_{лв} (t - 3) + n_t,$$

значение шума описывается моделью – $n_t = a_t$, где ∇ – первые разности, а значения под коэффициентами – их стандартные ошибки.

Полученные модели анализируются на адекватность реального процесса влияния температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с левой и правой стороны на расход дымовых газов котельного агрегата с помощью диагностической проверки [13], осуществляемой в два этапа: сначала вычисляется χ^2 – статистика для значений автокорреляционной функции остаточных ошибок $r_{aa}(k)$ как $Q = (N-s-b-r); \sum_{k=1}^k r \alpha^2(k)$, где N – число наблюдений, k – максимальная задержка автокорреляций и взаимных корреляций, s – число «правосторонних» параметров динамической стохастической модели, b – число «левосторонних» параметров, далее вычисляется χ^2 статистика с использованием взаимных корреляционных функций

$r_{aa}(k)$ между выравненным входным рядом α_t и рядом остаточных ошибок, а r как $H = (N-s-b-r) \sum_{k=1}^k r(k)$.

В первом случае Q сравнивается с χ^2 – распределением с $K-p-q$ степенями свободы, а во втором – H сравнивается с χ^2 – распределением с $K-r-S$ степенями свободы [9].

В табл. 3 приведены значения коэффициентов χ^2 – статистики диагностической проверки по автокорреляционной и взаимной корреляционной функциям.

Диагностическая проверка по автокорреляционным и взаимно-корреляционным функциям с использованием значений χ^2 статистики не дает оснований в сомнении адекватности модели [14].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены модели, позволяющие оценить влияние температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с левой и правой сторон на расход дымовых газов котельного агрегата.

Модели могут быть использованы для прогноза и управления расходом дымовых газов котельного агрегата в зависимости от температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства. При увеличении температуры уходящих газов расход дымовых газов возрастает, и, в конечном счете, увеличиваются потери тепла с дымовыми газами.

Библиографический список

1. Хапусов В.Г., Ермаков А.А., Подкорытов А.А. Исследование влияния расхода топлива на давление

уходящих газов в дымовой трубе газозвдушного тракта котельного агрегата как объекта с распреде-



ленными параметрами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9 (140). С. 133–140. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-133-140>

2. Коплярова Н.В. Непараметрическое моделирование нелинейных динамических систем / Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева // Труды XV Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 25–28 июня, 2013 г.). Самара, 2013. С. 136–141.

3. Павленко Е.Н. Особенности управления и моделирования технологических процессов в паровых котлах в условиях неопределенности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. Т. 4 (81). С. 184–187.

4. Серов Е.П., Корольков Б.П. Динамика парогенераторов. М.: Изд-во Энергоиздат, 1981. 409 с.

5. Хапусов В.Г., Баев А.В. Смешанные авторегрессионные модели и прогнозирование процесса выработки пара // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12 (95). С. 29–34.

6. Понамарев А.А. Модель газоздушного тракта теплоэнергетического котла как объекта регулирования // Сборник научных трудов НГТУ. 2010. № 3 (61). С. 19–28.

7. Шорохов В.А. Смольников А.П. Разработка динамической модели многосвязной АСР пылеугольного блока с прямым вдуванием пыли // Теплоэнергетика. 2009. № 10. С. 56–61.

8. Chernyaev A., Makarchyan V., Andryushin A. Combined Heat and Power Plants Load Distribution Optimization. International Universities' Power Engineering Conference – 2010 (Velikobritaniya, Kardiff, 24 April 2010). Kardiff, 2010. P. 710.

9. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis, Forecasting and Control, San Francisco: Holden-Day, 1976. 575 p.

10. Шевчук В.П., Грошев Н.А., Еремин Д.В. Моделирование переходных процессов в задаче управления полутопками в котлоагрегате // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Процессы преобразования энергии и энергетические установки. 2008. № 6 (44). С. 85–88.

11. Vojtesek J., Spacek L. Cybernetics and algorithms in intelligent systems // Proceedings of 7th computer science on-line conference, Tomas Bata University (Czech Republic, Zlin, 17 May 2018). Zlin, 2018. Vol. 3. 136 p.

12. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time series analysis: forecasting and control. 5th Edition. Wiley, 2015. 712 p.

13. Оскорбин Н.М., Беднаржевский В.С. Разработка пакетов и комплексов программ в теплоэнергетике // Известия Алтайского государственного университета. 2004. № 1 (31). С. 058–062.

14. Радайкина Д.С., Муравьева Е.А. Проблемы, возникающие при эксплуатации паровых котлоагрегатов. Оренбург: Изд-во ОГУ, 2018. 133 с.

References

1. Hapusov V.G., Ermakov A.A., Podkorytov A.A. Study of fuel consumption effect on flue gas pressure in the stack of the air and gas path of a boiler unit as an object with distributed parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 9 (140), pp. 133–140. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-133-140>

2. Kopyarova N.V. Nonparametric modeling of nonlinear dynamic systems / N.V. Kopyarova, H.A. Sergeeva // Proceedings of XV International Conference "Problems of Control and Modeling in Complex Systems" (Samara, June 25–28, 2013). Samara, 2013, pp. 136–141.

3. Pavlenko E.N. Features of control and modeling of technological processes in steam boilers under uncertainty // *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki*. [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, vol. 4 (81), pp. 184–187.

4. Serov E.P., Korol'kov B.P. *Dinamika parogeneratorov* [Dynamics of steam generators]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981, 409 p. (In Russ.).

5. Hapusov V.G., Baev A.V. Mixed autoregressive models and steam production forecast. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 12(95), pp. 29–34. (In Russ.).

6. Ponomarev A.A. Model of air-gas circuit of heat pow-

er boiler as control object. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university], 2010, no. 3 (61), pp.19–28. (In Russ.).

7. Shorohov V.A. Smol'nikov A.P. Development of a mathematical model simulating the multiply connected automatic control system of a coal-fired power unit equipped with a direct-injection dust feed system. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2009, no. 10, pp. 56–61. (In Russ.).

8. A., Makarchyan V., Andryushin A. Combined Heat and Power Plants Load Distribution Optimization. International Universities' Power Engineering Conference – 2010 (Velikobritaniya, Kardiff, 24 April 2010). Kardiff, 2010, p. 710.

9. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis, Forecasting and Control, San Francisco: Holden-Day, 1976, 575 p.

10. Shevchuk V.P., Groshev N.A., Eremin D.V. Simulation of transient processes in the problem of semi-furnace control in a boiler unit. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Processy preobrazovaniya energii i energeticheskie ustanovki* [Izvestia VSTU. Series: Energy Conversion Processes and Power Plants], 2008, no. 6 (44), pp. 85–88. (In Russ.).

11. Vojtesek J., Spacek L. Cybernetics and algorithms

in intelligent systems // Proceedings of 7th computer science on-line conference, Tomas Bata University (Czech Re-public, Zlin, 17 May 2018). Zlin, 2018, vol. 3, 136 p.

12. G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time series analysis: forecasting and control. 5th Edition. Wiley, 2015, 712 p.

13. Oskorbin N.S., Bednarzhevskij V.S. Development of packages and software complexes in heat power engi-

neering. *Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya of Altai State University Journal], 2004, no. 1 (31), pp. 58–62. (In Russ.).

14. Radaikina D.S., Murav'eva E.A. *Problemy, vozni-kayushchie pri ekspluatatsii parovyh kotloagregatov* [Problems arising in steam boiler operation]. Orenburg: Orenburg state University Publ., 2018, 133 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Хапусов В.Г., Подкорытов А.А., Ермаков А.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Хапусов Владимир Георгиевич,

доктор технических наук,
профессор кафедры автоматизации
производственных процессов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: hapusov@yandex.ru

Подкорытов Алексей Александрович,

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

Ермаков Андрей Андреевич,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: ermakov.istu@gmail.com

Authorship criteria

Khapusov V.G., Podkorytov A.A., Ermakov A.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir G. Khapusov,

Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Automation of Industrial
Processes,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: hapusov@yandex.ru

Aleksei A. Podkorytov,

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

Andrei A. Ermakov,

Postgraduate student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: ermakov.istu@gmail.com



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.782; 628.477.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-4-805-815>

Гранулирование пылевых отходов кремниевого производства для возврата в технологический процесс

© Н.В. Евсеев*, А.А. Тютрин**, М.П. Пастухов**

*ООО фирма «Сплав», г. Иркутск, Россия

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

Резюме: Цель – предложить технологию гранулирования пылевых отходов производства металлургического кремния для возврата в процесс руднотермического восстановления кремнезема, включающую стадии магнитной сепарации, грануляции и сушки. Опытные работы по отделению оксида железа от циклонной пыли выполнены с использованием магнитного анализатора типа АМР (Украина). Работа по гранулированию проводилась на барабанном грануляторе Р-020 (Россия). Анализ химического состава проводился на оптико-эмиссионном спектрометре Varian 730-ES (США). Установлено, что методом магнитной сепарации пыли циклонов производства кремния отделяется до 37% оксида железа. В лабораторных условиях окомкования в барабанном грануляторе были получены гранулы размером 10–70 мм, обладающие пористостью 40–45%. Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность использования отходов производства в технологии получения кремния металлургических марок в качестве добавки в окомкованном виде к основной (кусковой) шихте. На основе полученных результатов была предложена линия гранулирования пылевых отходов.

Ключевые слова: производство кремния, пыль циклонов, магнитная сепарация, аморфный кремнезем, восстановитель, грануляция

Благодарности: Работа выполнена по НИР 11.7210.2017/8.9 в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ.

Информация о статье: Дата поступления 06 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 27 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Евсеев Н.В., Тютрин А.А., Пастухов М.П. Гранулирование пылевых отходов кремниевого производства для возврата в технологический процесс. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):805–815. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-805-815

Granulation of silicone production dust waste for recycling

N.V. Evseev, A.A. Tyutrin, M.P. Pastukhov

Splav LLC, Irkutsk, Russia

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to propose a granulation technology for dust waste of metallurgical silicon production for its recycling in the process of ore-thermal reduction of silica. The technology includes the stages of magnetic separation, granulation and drying. Experimental works on iron oxide separation from cyclone dust were performed using a magnetic analyzer of the AMR type (Ukraine). Granulation was carried out using a drum granulator R-020 (Russia). The chemical composition was analyzed with the help of an optical emission spectrometer Varian 730-ES (USA). It has been determined that up to 37% of iron oxide is separated by the method of magnetic separation of silicon production cyclone dust. In the laboratory pelletization in a drum granulator the granules of 10-70 mm in size with the porosity of 40-45% were obtained. The carried out experiments have showed that there is a possibility in principle to use production wastes in the production technology of silicon of metallurgical grades as a pelletized additive to the main (lump) charge. Based on the results obtained, a line for granulating dust waste was proposed.

Keywords: silicon production, cyclone dust, magnetic separation, amorphous silica, reducing agent, granulation

Acknowledgements: The work has been performed under the research 11.7210.2017/8.9 within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Information about the article: Received February 06, 2019; accepted for publication June 27, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Evseev N.V., Tyutrin A.A., Pastukhov M.P. Granulation of silicone production dust waste for recycling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):805–815. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-805-815

1. ВВЕДЕНИЕ

Производство кремния в промышленных масштабах было начато в 1938 г. на Днепровском алюминиевом заводе (ныне Запорожский производственный алюминиевый комбинат) на однофазных печах мощностью 5 МВ·А с применением высокосортного кварцита Банического месторождения и наиболее активного углеродсодержащего восстановителя – древесного угля¹. При этом извлечение кремния из его оксида было относительно высоким (87–90%) и поэтому потерям кремнезема с газами, достигавшими 400–500 кг колошниковой пыли на тонну кремния, должного внимания не уделяли.

С ростом развития производства кремния, в частности с пуском трехэлектродных круглых руднотермических печей (РТП) с вращающейся ванной (мощностью 16,5 и 25 МВ·А), в цехе производства кремния Иркутского алюминиевого завода (ныне АО «Кремний» ОК «РУСАЛ», г. Шелехов) возникла необходимость в расширении сырьевой базы и экономии дефицитного и дорогостоящего древесного угля. Это привело к использованию большого количества низкозольного каменного угля при выплавке кремния, нефтекокса и древесной щепы – при ограниченном расходе древесного угля. При этом несколько снизилась себестоимость выплавляемого кремния, но одновременно понизилось и извлечение кремния из кварцита – до 65–80% [1].

Снижение извлечения кремния из сырья и использование большого набора углеродсодержащих восстановителей (каменного угля – до 1200 кг/т, древесной щепы – до 2500 кг/т, нефтекокса – до 420 кг/т)

без отсева их мелких фракций (–6 мм) привело к увеличению количества образующейся колошниковой пыли от 600 до 900 кг на 1 т выплавляемого продукта² [2, 3], что значительно снижает технико-экономические показатели плавки, приводит к необходимости применения мощных, энергоемких систем газоочистки, требует больших земельных площадей под шламовые поля и отвалы, тем самым усложняя экологическое состояние регионов.

Усовершенствование технологических процессов на металлургических предприятиях России и расширение сырьевой базы (за счет вовлечения техногенных отходов) является неотъемлемой частью повышения эффективности производства [2–8].

В настоящее время зарубежные фирмы по производству высокочистого ферросилиция и технического кремния проводят широкие исследования в направлении использования колошниковой пыли. Норвежский концерн «Elkem» данную пыль после соответствующей обработки (снижение содержания примесей и увеличение насыпной массы) реализует как микрокремнезем [9]. Содержание в нем до 96–98% аморфного диоксида кремния в виде тонкодисперсного материала позволяет рассматривать его в сравнении с товарными кремнеземными порошками: аэрозолями, белой сажой, диатомитом и др. Поэтому указанная пыль находит самое широкое применение: в качестве сырья для выплавки ферросилиция и кремния, в производстве строительных и огнеупорных материалов, кабельного пластиката, жидкого стекла и др. [3, 9–13].

¹Днепровский алюминиевый завод имени С.М. Кирова // Украинская советская энциклопедия. Киев: Украинская советская энциклопедия, 1980. Т. 3. 391 с. / Dneprovsky Aluminum Plant named after S.M. Kirov // Ukrainian Soviet Encyclopedia. Kiev: Ukrainian Soviet Encyclopedia, 1980, vol. 3, 391 p.

²Немчинова Н.В., Шумилова Л.В., Салхофер С.П., Размахнин К.К., Чернова О.А. Комплексное устойчивое управление отходами. Металлургическая промышленность: учеб. пособ. М.: ИД «Академия Естествознания», 2016. 494 с. / Nemchinova N.V., Shumilova L.V., Salkhofer S.P., Razmakhnin K.K., Chernova O.A. Integrated sustainable waste management. Metallurgical industry: Learning aids. Moscow, Academy of Natural Sciences Publ., 2016, 494 p.

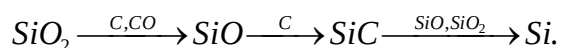


На отечественных заводах уловленная колошниковая пыль характеризуется неоднородностью гранулометрического и химического состава. Сравнить данный продукт с товарными кремнеземными порошками не представляется возможным и поэтому область его возможного применения значительно сокращена. Исходя из этого, пылевидные отходы производства кремния (колошниковая пыль и отсеvy восстановителей) практически не используются и вывозятся в отвал или на шламовые поля. Имеющиеся рекомендации по использованию этих пылей в производстве жидкого стекла и строительных материалов, применения в качестве футеровочных материалов широкого практического применения не нашли.

Таким образом, в настоящее время весьма актуальна работа по увеличению извлечения кремния из сырья при снижении образования пылевых отходов, а также разработка способов их утилизации.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Взаимодействие кремнезема с углеродом может быть представлено следующей схемой [14]:



Согласно этой схеме, по мнению большинства исследователей, на первой стадии восстановления происходит газификация кремнезема в присутствии углерода с образованием SiO. На второй стадии SiO взаимодействует с углеродом в объеме восстановителя, образуя карбид кремния. Элементарный кремний образуется в результате разрушения SiC оксидами кремния [15–17].

Сложность технологического процесса восстановления кремния связана с тем, что один из его продуктов, монооксид кремния SiO – газообразный при высокой

температуре – конденсируется при ее понижении. Поэтому зафиксировать и обычными химическими (или физическими) методами оценить состав газов, образующихся при высоких температурах в нижних горизонтах ванны печи, невозможно, что создает трудности для экспериментального изучения процесса получения кремния. По этой же причине восстановление кремния углеродом всегда сопровождается интенсивным пылеобразованием [17, 18].

Образующаяся при восстановлении кремния в РТП пыль состоит из трех видов продуктов³:

- дисперсные продукты химического реагирования в шихте типа Si и SiO₂, полученные по реакции диспропорционирования, SiO₂ – продукт окисления паров Si и SiO; CaO – продукт окисления паров кальция; Al₂O₃ – продукт диспропорционирования и окисления Al₂O, AlO;

- мелкие частицы компонентов шихты из колошниковой слоя, образованные после контрольного грохочения и отделения мелочи в результате переизмельчения при дозировке, транспортировке и загрузке шихты в печь;

- продукты измельчения компонентов шихты в горне (кварцита и особенно углеродистых материалов) в ходе восстановления и разукрупнения реагирующих частиц при осадке и опиковке шихты.

Объектом данного исследования является пыль газоочистки предварительной ступени очистки газов АО «Кремний», состоящая из камер предварительного осаждения и конических циклонов [19].

Крупные фракции пыли, масса которых составляет примерно 20–30% от массы пыли (табл. 1), обогащены углеродом, карбидом кремния и тяжелыми фракциями Fe₂O₃, Al₂O₃ и CaO. Общее содержание углерода в них составляет в среднем 27%, достигая 32%. Кремний в пыли присутствует в форме карбида и аморфного оксида, содержание которых достигает 30 и 60%,

³Евсеев Н.В. Разработка технологии выплавки кремния с использованием пылевых отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.03. Иркутск, 1991. 17 с. / Evseev N.V. Development of silicon smelting technology using dust waste: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.16.03. Irkutsk, 1991, 17 p.

Таблица 1

Гранулометрический состав пыли, уловленной в различных аппаратах систем газоочистки руднотермических печей, %

Table 1

Particle size distribution of the dust caught in various apparatuses of gas cleaning systems of ore-thermal furnaces, %

Фракция, мкм	-1,0	1-10	10-40	40-80	80-200	200-400	400-1000	+1000
Пыль из камер РТП 1, 2	1,0	1,5	2,7	4,1	12,3	24,5	36,4	17,5
Пыль из циклонов РТП 3, 4	4,2	7,3	27,8	24,3	18,1	9,9	5,1	3,3
Пыль из циклонов РТП 5	0,9	1,9	2,0	3,2	10,6	18,3	36,1	26,7
Пыль из труб Вентури	59,5	14,0	10,6	4,9	4,0	3,6	2,1	1,3

Таблица 2

Химический состав пыли

Table 2

Chemical composition of dust

Элемент	Содержание, масс. %	
	Пыль осадительной камеры	Пыль циклонов
Al	0,455	0,545
Ca	1,514	0,929
Fe	0,377	0,461
Si	40,671	33,248
Mg	0,136	0,131
Mn	0,036	0,030
P	0,036	0,027
K	0,256	0,243
Ti	0,016	0,019
Cr	0,006	0,007
Cu	0,005	0,003
Zn	0,091	0,035
Прочие	56,401	64,321
Итого	100	100

соответственно. С учетом SiC содержание SiO_2 (в пересчете) в среднем составляют 90% (табл. 2).

Изучение крупнодисперсной пыли с помощью рентгеноструктурного и кристаллооптического анализов позволило установить, что значительная часть карбида кремния в ней находится в виде метастабильной модификации β -карбида кремния, где свободный углерод, в основном, представлен в виде мелочи древесного угля, а кремнезем в пыли представлен в аморфном состоянии.

Также установлено, что примеси железа в пыли находятся, в основном, в виде магнетита Fe_3O_4 и когенина FeO , ко-

торые обладают магнитными свойствами.

Приведенные данные показывают, что пыль электропечей может быть использована после магнитного обогащения как добавка к шихте с учетом содержания примесей Fe, Ca и Al, а также углерода и SiC. Однако данный вид мелкодисперсного альтернативного сырья невозможно непосредственно использовать при плавке в печи по причине его значительного пылевыноса. Окомкование шихтовых материалов является одним из способов рационального использования данных кремнеземсодержащих сырьевых материалов, что будет способствовать повышению эффективности действующего производства [2, 6, 9].



2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

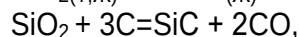
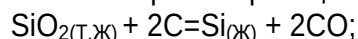
Сдерживающим фактором для возврата пыли в производство кремния является повышенное содержание в пыли примесей Al, Ca, Fe. Примеси Al и Ca удаляются на стадии окислительного рафинирования готового продукта в ковше, а примесь Fe можно удалить магнитной сепарацией пыли. Опытные работы по отделению оксида железа от циклонной пыли проводились в ООО НИиПИ «ТОМС» с использованием магнитного анализатора типа АМР («Продэкология», Россия): магнитная индукция 10-900 мТл, очистка магнитного блока механическая, материал магнитов Nd-Fe-B.

Работа по гранулированию проводилась на барабанном грануляторе, длиной 2 м и диаметром 0,9 м, скорость вращения барабана составляла 0,3–0,5 об/с. Гранулятор состоял из трех камер, в первую камеру попадала пыль и одновременно с этим в гранулятор равномерной струей подавали раствор связующего. Гранулы получались размером от 10 до 70 мм, мелочь (<10 мм) отсеивали на грохоте и возвращали в первую камеру. Водный раствор связующего (технический лигносульфонат) плотностью 1,1–1,2 кг/м³ подавали в количестве 3–7% (на сухую массу связующего) от массы пыли.

3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АМОРФНОГО КРЕМНЕЗЕМА ПЫЛИ

В традиционной схеме производства кремния и ферросилиция в качестве кремнеземсодержащего сырья используется кварцит, в котором SiO₂ содержится в кристаллической форме, однако, как указывалось выше, в пыли газоочистки кремниевое производство присутствует аморфный кремнезем.

Учитывая сложность сравнения поведения SiO_{2α-кр} и SiO_{2аморф} в промышленной печи, а также определенные трудности при моделировании процесса плавки в лабораторных условиях, необходимо провести дополнительные работы. Целесообразней всего предварительно теоретически рассчитать вероятность и температуру появления продуктов Si и SiC, проведя термодинамический расчет реакций:



для кристаллического α-кварцита и аморфного кремнезема. Расчетные значения энергии Гиббса данных реакций образования Si и SiC (с учетом изменения модификации SiO₂) при различных температурах показаны в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что термодинамически возможна реакция взаимодействия SiO_{2аморф} с углеродом, тем более темпера-

Таблица 3

Расчетные энергии Гиббса реакций образования Si и SiC при различных температурах

Table 3

Calculated Gibbs energies of Si and SiC formation reactions at different temperatures

Реакция	Значение ΔG° (Дж/моль) при температуре, °C		
	298	1500	2000
SiO _{2α-кр} + 2C = Si + 2CO	689880 – 360,61T	701190 – 360,61T	718660 – 360,61T
SiO _{2аморф} + 2C = Si + 2CO	682430 – 355,59T	689169 – 355,59T	700153 – 355,59T
SiO _{2α-кр} + 3C = SiC + 2CO	628091 – 352,54T	639278 – 352,54T	656405 – 352,54T
SiO _{2аморф} + 3C = SiC + 2CO	620641 – 347,52T	627502 – 347,52T	638043 – 347,52T

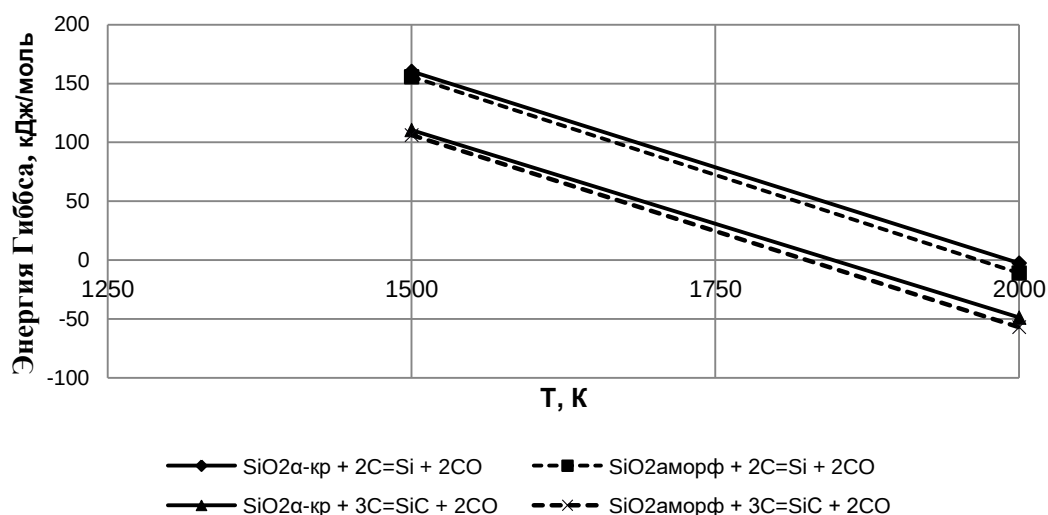


Рис. 1. Изменение энергии Гиббса от температуры для реакций образования Si и SiC из кремнезема модификаций SiO₂аморф и SiO₂α-кр
 Fig. 1. Gibbs energy variation depending on temperature for the formation reactions of Si and SiC from silica of SiO₂amorphous and SiO₂α-silica modifications

тура начала взаимодействия SiO₂аморф с углеродом (в сравнении с SiO₂α-кр ниже на 75–78°C), что также видно из рис. 1.

Из вышесказанного следует, что применение аморфного кремнезема как кремнийсоставляющего материала (совместно с углеродистым восстановителем) в процессе высокотемпературного синтеза карбида кремния позволяет получить Si и SiC в более низком диапазоне температур, нежели при использовании кристаллического SiO₂.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки возможности применения магнитной сепарации для удаления оксидов железа была проведена серия экспериментов по обработке образцов пыли массой 1000 г. Выход магнитной фракции для образцов пыли, уловленной в осадительной камере и коническом циклоне, составляет в среднем 2,8 и 3,0%, соответственно. Полученные магнитная и немагнитная фракции пыли анализировались на оптико-эмиссионном спектрометре Varian 730-ES (США), табл. 3.

Как видно из данных табл. 2, 3, степень удаления железа из пыли осадитель-

ной камеры и циклонов составляет 33,7 и 36,9%, соответственно, это является удовлетворительным результатом; следовательно, можно сделать вывод, что удаление железа магнитной сепарацией возможно, при этом содержание железа в пыли снижается до 0,25%.

После удаления железа пыль можно вернуть в процесс производства кремния в окомкованной форме. Окомкованный материал должен обладать определенными свойствами при попадании в зону высоких температур РТП (достаточной восстановимостью, термостойкостью и механической прочностью [2]). По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что гранулирование как способ окомкования пылевых отходов (пыли циклонов) является более перспективным по сравнению с брикетированием. Появляется возможность контролировать размеры гранул, повышать пористость окускованной шихты и упрощается аппаратно-технологическая схема подготовки шихты.

В лабораторных условиях окомкования в барабанном грануляторе были получены гранулы размером 10–70 мм, имеющие следующие физические показатели:

Влажность получаемых гранул – 19,5%.



Таблица 3

Химический состав образцов пыли до и после магнитной сепарации

Table 3

Chemical composition of dust samples before and after magnetic separation

Элемент	Содержание, масс. %			
	Пыль осадительной камеры		Пыль циклонов	
	Немагнитная фракция	Магнитная фракция	Немагнитная фракция	Магнитная фракция
Al	0,435	1,160	0,520	1,340
Ca	1,480	2,710	0,910	1,540
Fe	0,250	4,800	0,291	5,990
Si	45,80	41,20	33,20	34,80
Mg	0,128	0,430	0,124	0,369
Mn	0,034	0,088	0,029	0,068
P	0,035	0,077	0,026	0,065
K	0,249	0,490	0,237	0,451
Ti	0,014	0,077	0,017	0,089
Cr	0,006	0,013	0,007	0,013
Cu	0,005	0,010	0,003	0,010
Zn	0,093	0,009	0,036	0,010
Прочие	51,471	48,936	64,600	55,255
Итого	100	100	100	100

Примечание / Note. *Прочие представлены в основном кислородом оксидов и углеродом / Others are mainly represented by the oxygen from oxides and carbon.

Влажность после естественной сушки – 15,0%.

Для реализации технологии окомкования на предприятии АО «Кремний» предполагается гранулировать пыль из циклонов печей № 3-4 (1,4 т/ч) и циклонов печи № 5 (0,25 т/ч). Общая производительность линии должна составлять 1,65 т/ч.

Пыль, уловленная в циклонах при помощи скребковых конвейеров, поступает в приемные бункера линии гранулирования (рис. 2). Из приемного бункера пыль (с целью удаления примесей железа) подается на электромагнитный валковый сепаратор. Далее при помощи винтового конвейера пыль направляется в гранулятор.

Связующее (водный раствор технических лигносульфонатов) равномерной струей подается также в гранулятор. Доставку связующего на завод предполагается осуществлять в обогреваемых цистернах, его плотность составляет 1250 кг/м³, pH раствора 4,85–4,9. Из цистерн связующее поступает на хранение в обогреваемую

емкость и оттуда отправляется в бак для приготовления рабочего раствора, где разбавляется водой до плотности 1130 кг/м³. Для гранулирования 1 т пыли требуется 150–180 л связующего.

Гранулятор снабжен грохотом, что позволяет гранулы размером менее 10 мм отсеивать и возвращать в первую камеру гранулятора. Сырые гранулы размером 10–70 мм из гранулятора направляются на сушку в ленточную сушилку. Высушенные гранулы поступают на склад сырья и восстановителей, а оттуда в бункер отделения дозирования основного производства.

При проектировании линии гранулирования следует предусмотреть:

- приемные бункеры для пыли – газоочистка;
- для очистки пыли от соединений железа – электромагнитный валковый сепаратор;
- для транспортирования – винтовой конвейер;

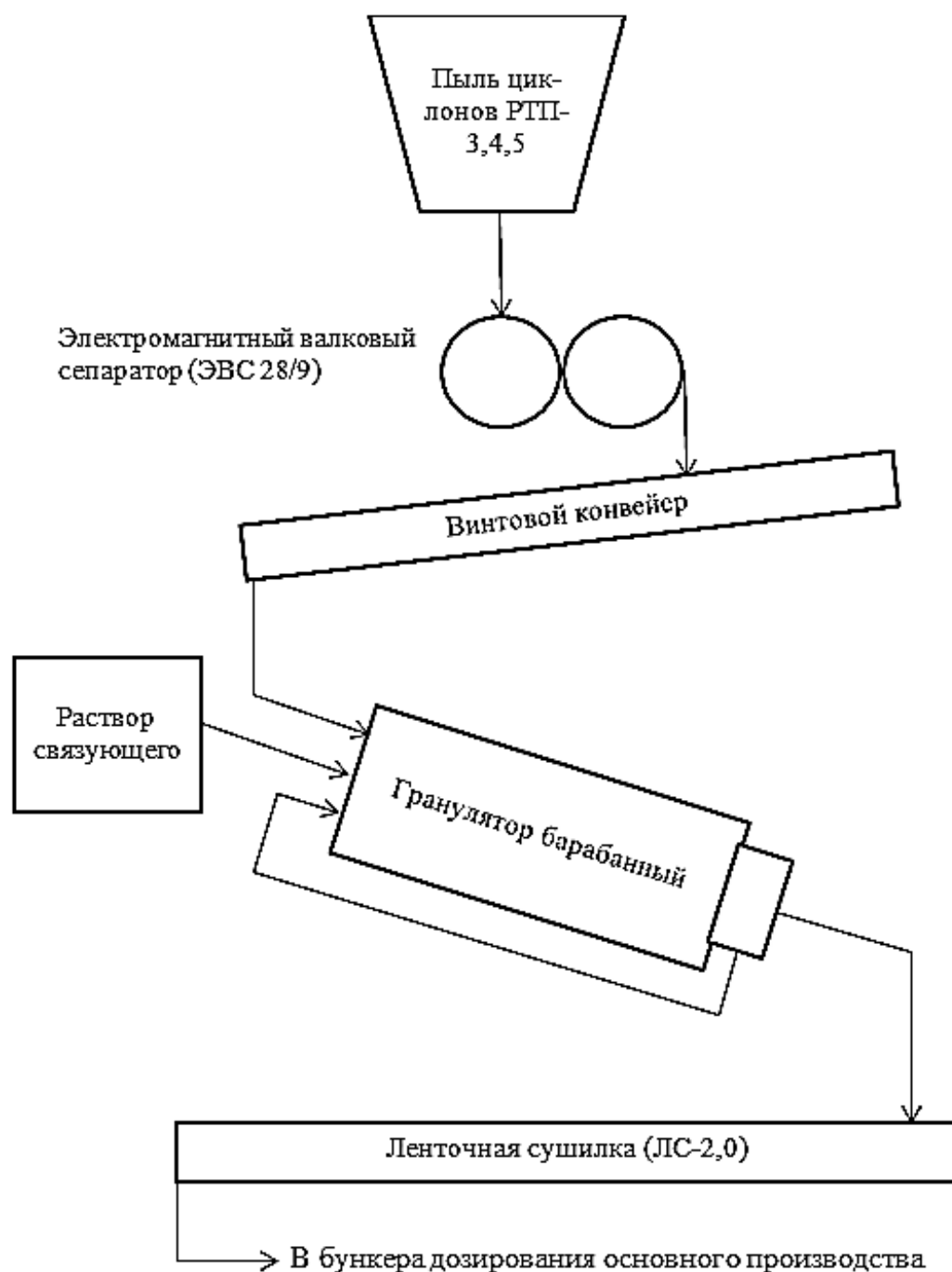


Рис. 2. Транспортно-техническая схема линии гранулирования пылевых отходов РТП АО «Кремний»
 Fig. 2. Transportation and technical diagram of the dust waste granulation line of Kremniy JSC ore thermal furnaces

– для гранулирования пылевых отходов – установку барабанного гранулятора, которая состоит из шнека горизонтального, шнекового питателя, барабанного гранулятора;
 – для сушки гранул – ленточную сушилку.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе изучения свойств пылевых отходов производства кремния выявлено, что кремнеземсодержащая пыль обогащена такими ценными компонентами как карбид кремния и свободный углерод, и пред-



ставляется целесообразным использовать ее путем возврата в процесс выплавки кремния.

Сдерживающим фактором для возврата явилось повышенное содержание в пыли примесей Al, Ca, Fe. В ходе работы была рассмотрена магнитная сепарация как способ очистки от железа пылевидного сырья для производства кремния. С использованием магнитного анализатора типа АМР были проведены опытные работы по отделению оксидов железа от циклонной пыли. В результате анализа проб с применением оптико-эмиссионного спектрометра было установлено, что сепарацией отделяется 36,9% оксида железа.

Из данных анализа гранулометрического состава видно, что изучаемый сырьевой материал является мелкодисперсным, поэтому его загрузка в РТП не представляется возможной. Были рассмотрены работы по окомкованию пылевых отходов. На основе изученного материала был сделан выбор в пользу гранулирования как способа окускования. В качестве связующего предполагается использование технического лигносульфоната. На 1 т циклонной пыли предполагается использовать 150–180 л связующего. На основе полученных результатов была предложена линия гранулирования пылевых отходов.

Библиографический список

1. Катков О.М. Технология выплавки технического кремния. Иркутск: ЗАО «Кремний», 1999. 245 с.
2. Nemchinova N.V., Mineev G.G., Tyutrin A.A., Yakovleva A.A. Utilization of Dust from Silicon Production / Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 12. P. 763–767.
3. Kondrat'ev V.V., Nemchinova N.V., Ivanov N.A., Ershov V.A., Sysoev I.A. New production solutions processing silicon and aluminum production waste // Metallurgist. 2013. Vol. 57. No. 5–6. P. 455–459.
4. Sergeev V.A., Sergeeva Yu.F., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S., Karelov S.V. Processing of technogenic lead-containing intermediates using complexing agentsolutions // Metallurgist. 2013. Vol. 57. No. 1-2. P. 80–82.
5. Полях О.А., Руднева В.В., Якушевич Н.Ф., Галевский Г.В., Аникин А.Е. Применение техногенных отходов металлургических предприятий для производства карбида кремния // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. № 8. С. 5–12.
6. Mann V., Pingin V., Zherdev A., Bogdanov Y., Pavlov S., Somov V. SPL Recycling and Re-processing // The Minerals, Metals & Materials Series. Light Metals. 2017. P. 571–578.
7. Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Yu. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex // Non-Ferrous Metals. 2016. Issue. 1. P. 32–37.
8. Bazhin V.Yu., Brichkin V.N., Sizyakov V.M., Cherkasova M.V. Pyrometallurgical processing of nepheline furnace charge with use of additives of a natural and technogenic origin // Metallurgist. 2017. No. 2. P. 68–74.
9. Черняховский Л.В., Баранов А.Н., Киселев А.И., Шишкин Г.А. Использование отходов кремниевых, алюминиевых и химических производств при выплавке кремния и ферросилиция // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов и ученых алюминиевой, магниевой и электродной промышленности (г. Санкт-Петербург, сентябрь 2000 г.). Санкт-Петербург, 2000. С. 79.
10. Водопьянов А.Г., Памятных О.А., Кожевников Г.Н., Кузьмин Б.П. Влияние минеральных добавок на процесс образования дисперсного карбида кремния // Неорганические материалы. 2000. Т. 36. № 7. С. 831–835.
11. Ivanchik N.N., Balanovsky A.E., Kondratyev V.V., Tyutrin A.A. Research of silicon waste processing products as ultradispersed activating fluxes of arc welding // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. No. 11(2). P. 155–167.
12. Виноградов С.В., Молчанов Б.В., Башкатов А.А., Суворов А.А. Перспективы использования пыли газоочисток производства ферросилиция // Сталь. 1989. № 4. С. 41–44.
13. Kraus H., Pichocki E. Chem. Wapno-Gips. 1973. No. 28(3). P. 88–91.
14. Попов С.И. Металлургия кремния в трехфазных рудотермических печах. Иркутск: ЗАО «Кремний», 2004. 237 с.
15. Ringdalen E., Tangstad M. Reaction Mechanisms in Carbothermic Production of Silicon, Study of Selected Reactions International Smelting // Technology Symposium TMS. 2012. P. 195–203.
16. Катков О.М. Поведение металлов-примесей при выплавке кремния из кварцита в дуговой электропечи // Известия вузов. Цветная металлургия. 1993. № 3–4. С. 37–40.
17. Елкин К.С. Теория и практика получения металлического кремния // Цветные металлы и минералы 2016: сб. тезисов докладов VIII Междунар. конгресса (г. Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.). Красноярск, 2016. С. 128–129.
18. Катков О.М. Причины потерь кремния при выплавке кварцита в дуговой электропечи // Известия

вузов. Цветная металлургия. 1994. № 4. С. 3–5.
19. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Sokolnikova Yu.V., Fereferova T.T. Analytical Investigations of Silicon Pro-

duction Raw Materials and Products // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2017. Vol. 10. No. 1. P. 37–48.

References

1. Katkov O.M. *Tekhnologiya vyplavki tekhnicheskogo kremniya* [Technical silicon smelting technology]. Irkutsk: ZAO «Kremnij», 1999, 245 p. (In Russ.).
2. Nemchinova N.V., Mineev G.G., Tyutrin A.A., Yakovleva A.A. Utilization of Dust from Silicon Production. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 12, pp. 763–767.
3. Kondrat'ev V.V., Nemchinova N.V., Ivanov N.A., Ershov V.A., Sysoev I.A. New production solutions processing silicon and aluminum production waste. *Metallurgist*. 2013, vol. 57, no. 5–6, pp. 455–459.
4. Sergeev V.A., Sergeeva Yu.F., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S., Karelov S.V. Processing of technogenic lead-containing intermediates using complexing agent solutions. *Metallurgist*. 2013. vol. 57, no. 1–2, pp. 80–82.
5. Polyah O.A., Rudneva V.V., Yakushevich N.F., Galevskij G.V., Anikin A.E. Use of technogenic waste from metallurgical enterprise for silicon carbide production. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2014, no. 8, pp. 5–12. (In Russ.).
6. Mann V., Pingin V., Zherdev A., Bogdanov Y., Pavlov S., Somov V. SPL Recycling and Re-processing. *The Minerals, Metals & Materials Series. Light Metals*. 2017, pp. 571–578.
7. Sizyakov, V.M., Vlasov, A.A., Bazhin, V.Yu. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex. *Non-Ferrous Metals*. 2016, Issue 1, pp. 32–37.
8. Bazhin V.Yu., Brichkin V.N., Sizyakov V.M., Cherkasova M.V. Pyrometallurgical processing of nepheline furnace charge with use of additives of a natural and technogenic origin. *Metallurgist*. 2017, no. 2, pp. 68–74.
9. Chernyahovskij L.V., Baranov A.N., Kiselev A.I., Shishkin G.A. *Ispol'zovanie othodov kremnievykh, aluminievykh i himicheskikh proizvodstv pri vyplavke kremniya i ferrosiliciya* [Use of waste silicon, aluminum and chemical industries in silicon and ferrosilicon smelting]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii molodykh specialistov i uchenykh alyuminievoj, magnievoj i elektrodnoj promyshlennosti* [Abstracts of the International Scientific and Technical Conference of Young Specialists and Scientists of the Aluminum, Magnesium and Electrode Industry]. St. Petersburg, September, 2000, pp. 79. (In Russ.).
10. Vodop'yanov A.G., Pamyatnyh O.A., Kozhevnikov G.N., Kuz'min B.P. The effect of mineral additives on dispersed silicon carbide formation. *Neorganicheskie materialy*. 2000, vol. 36, no. 7, pp. 831–835. (In Russ.).
11. Ivanchik N.N., Balanovsky A.E., Kondratyev V.V., Tyutrin A.A. Research of silicon waste processing products as ultradispersed activating fluxes of arc welding/ *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018, no. 11(2), pp. 155–167.
12. Vinogradov S.V., Molchanov B.V., Bashkatov A.A., Suvorov A.A. Application prospects of ferrosilicon production purification dust. *Stal'* [Steel]. 1989, no. 4, pp. 41–44. (In Russ.).
13. Kraus H., Pichocki E. *Chem. Wapno-Gips*. 1973, no. 28(3), pp. 88–91.
14. Popov S.I. *Metallurgiya kremniya v trekhfaznykh rudnotermicheskikh pechah* [Silicon metallurgy in three-phase ore-smelting furnaces]. Irkutsk: ZAO «Kremnij», 2004, 237 p.
15. Ringdalen E., Tangstad M. Reaction Mechanisms in Carbothermic Production of Silicon, Study of Selected Reactions International Smelting. Technology Symposium TMS. 2012, pp. 195–203.
16. Katkov O.M. Impurity behavior at silicon smelting from quartzite in an electric arc furnace. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Proceedings of Higher Schools Nonferrous Metallurgy]. 1993, no. 3–4, pp. 37–40. (In Russ.).
17. Elkin K.S. *Theory and practice of obtaining metallic silicon. Sbornik tezisov dokladov VIII Mezhdunarodnogo kongressa "Non-ferrous metals and minerals 2016"* [Collection of abstracts of reports of the VIII International Congress, Krasnoyarsk, September 13–16, 2016]. Krasnoyarsk, 2016, pp. 128–129. (In Russ.).
18. Katkov O.M. Causes of silicon loss at quartzite smelting in an electric arc furnace. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Proceedings of Higher Schools Nonferrous Metallurgy]. 1994, no. 4, pp. 3–5. (In Russ.).
19. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Sokolnikova Yu.V., Fereferova T.T. Analytical Investigations of Silicon Production Raw Materials and Products. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2017, vol. 10, no. 1, pp. 37–48.

Критерии авторства

Евсеев Н.В., Тютрин А.А., Пастухов М.П. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Evseev N.V., Tyutrin A.A., Pastukhov M.P. have equal authors rights and bear equal responsibility for plagiarism.



Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Евсеев Николай Владимирович,

кандидат технических наук, директор,
ООО фирма «Сплав»,
664007, г. Иркутск, ул. Советская, 55, Россия;
e-mail: splav93@mail.ru

Тютрин Андрей Александрович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: an.tu@inbox.ru

Пастухов Максим Петрович,

магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: pastukhovm_93@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay V. Evseev,

Cand. Sci. (Eng.), Director,
Splav LLC,
55 Sovetskaya St., Irkutsk 664007, Russia;
e-mail: splav93@mail.ru

Andrey A. Tyutrin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: an.tu@inbox.ru

Maxim P. Pastukhov,

Master Degree student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: pastukhovm_93@mail.ru



Автоматизация мониторинга и очистки от HF посредством красного шлама на участке электролизеров с анодом Содерберга

© Т.Ю. Комарова, А.А. Кульчицкий, А.Б. Лебедев, В.Ю. Бажин

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

Резюме: Для обеспечения своевременной корректировки изменения технологических параметров необходимо установить автоматизированный мониторинг технологического процесса на участке электролизеров Содерберга. Стоит задача утилизации отходов производства глинозема – красного шлама, который ежегодно накапливается и складывается в шламохранилищах. На каждую 1 т произведенного глинозема приходится около 1,5 т данного техногенного материала. Наиболее перспективным является использование системы технического зрения, которая фиксирует всевозможные изменения состояния технологического процесса. Второй составляющей является применение красного шлама в качестве поглотителя фторидов, который служит заменой традиционно используемого в системе «сухой» газоочистки дорогостоящего глинозема. При использовании комплекса камер наблюдения для информирования и оперативного реагирования автоматизированной системы управления технологическим процессом (в случае изменения его состояния) в качестве поглотителя фтористого водорода применение красного шлама повышает показатели средней поглотительной способности по фтору на 15%. Пульпа красного шлама с соотношением Ж:Т = 5:1 в качестве поглотительной добавки подается в систему скрубберов на участок очистки отходящих газов от вредных соединений. Высокая поглотительная способность красного шлама обусловлена наличием в его составе различных оксидов металлов. Для получения информации рационально использовать комплекс технического зрения, что решает следующие задачи: обеспечение автоматизированной системы управления технологическим процессом полных данных о ходе процесса; ведение технологического процесса без изменения графика регламентных работ, но с существенным снижением влияния человеческого фактора; прогнозирование анодного эффекта; оценка состояния горелочных устройств и условий дожигания отходящих газов (наличие пламени, засоренность горелочного устройства, цвет пламени, характер пламени); оперативная оценка герметизации. В качестве поглотительного материала для фторидов рекомендовано использовать красный шлам. В целом это позволит получить положительный эколого-экономический эффект.

Ключевые слова: электролизер Содерберга, автоматизация мониторинга, техническое зрение, выбросы фторидов, фтористый водород, красный шлам

Благодарности: Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (регистрационный номер проекта 11.4098.2017/ПЧ от 01.01.2017).

Информация о статье: Дата поступления 30 мая 2019 г.; дата принятия к печати 28 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Комарова Т.Ю., Кульчицкий А.А., Лебедев А.Б., Бажин В.Ю. Автоматизация мониторинга и очистки от HF посредством красного шлама на участке электролизеров с анодом Содерберга. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):816–828. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-816-828

Automation of monitoring and flue gas purification from HF by red mud on Søderberg cell site

Tatiana Yu. Komarova, Alexander A. Kulchitsky, Andrei B. Lebedev, Vladimir Yu. Bazhin

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract: Automated monitoring of the technological process at the site of Søderberg cells should be organized in order to provide timely adjustment of process parameter variation. The problem is set of disposal of red mud – alumina production waste, which is annually accumulated and dumped in slurry storages. There is about 1.5 ton of this man-made material for every 1 ton of alumina produced. The use of a vision system that captures all possible changes in the state of the technological process seems the most promising. The second component is the use of red mud as a fluoride absorber,

which replaces traditionally used expensive alumina in the "dry" gas cleaning system. When using a complex of surveillance cameras informing the automated process control system and ensuring its prompt respond (in the case of changes in the process state) the use of red mud as a HF absorber increases the average absorption capacity of fluorine by 15%. As an absorbing additive the pulp of red mud with the ratio of L:S=5:1 is fed into the scrubber system to the site of flue gas purification from harmful compounds. The high absorption capacity of red mud is due to the presence of various metal oxides in its composition. It is feasible to use a complex of technical vision to obtain information. It solves the following tasks: provides the automated process control system with complete data on the process; introduces the technological process without any changes in the schedule of routine maintenance but significantly decreases human factor influence; predicts the anode effect; estimates the state of burners and conditions of flue gas afterburning (presence of flame, burner clogging, flame colour, nature of flame); rapidly assesses pressurization. Red mud is recommended to apply as an absorbent material for fluorides. In general, this will provide a positive environmental and economic effect.

Keyword: Søderberg cell, monitoring automation, technical vision, fluoride emissions, hydrogen fluoride, red mud

Acknowledgements: The work is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project registration number 11.4098.2017 /dated 1 January 2017).

Information about the article: Received May 30, 2019; accepted for publication June 28, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Komarova T.Yu., Kulchitsky A.A., Lebedev A.B., Bazhin V.Yu. Automation of monitoring and flue gas purification from HF by red mud on Søderberg cell site. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):816–828. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-816-828

1. ВВЕДЕНИЕ

Основным промышленным способом получения алюминия является электролиз расплава криолита с растворенным в нем глиноземом (Al_2O_3), температура процесса – 950–960°C. Как и любое промышленное производство, выплавка алюминия сопряжена с экологическими рисками – выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, образованием твердых отходов, высоким потреблением электроэнергии [1–5].

На отечественных предприятиях алюминиевой промышленности более половины первичного алюминия выпускается на электролизерах с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом на силу тока 140–176 кА. Новые электролизные серии оснащаются исключительно электролизерами с обожженными анодами на силу тока 300 кА и выше [6]. Тем не менее еще долгие годы электролизеры с анодом Содерберга будут составлять существенную часть технопарка компании «РУСАЛ». В настоящее время осуществляется программа «ЭкоСодерберг», подразумевающая модернизацию электролизеров С8Б и С8БМ в целях снижения экологических рисков [7, 8]. Электролизеры оснащаются безгорелочным газосборным колоколом и но-

вой системой газоудаления, которые способны обеспечить эффективность укрытия до 96–98% [9]. Часть электролизеров не может быть переведена на технологию «ЭкоСодерберг» в силу конструктивных особенностей, и для ванн этого типа применяется комплекс мероприятий, направленных на сокращение времени разгерметизации электролизера, повышение эффективности системы газоотсоса и снижение выбросов через азрационные фонари. Основной стратегией деятельности предприятий является ведение технологического процесса без отклонений и аварийных ситуаций, а также регулирование анодного эффекта.

Существующие контрольно-измерительные средства диагностирования не в полной мере обеспечивают автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП) достоверной и актуальной информацией о значениях технологических параметров, осуществляется непрерывное автоматическое измерение только рабочего напряжения и тока серии [10, 11]. Состояние горелочных устройств и условия дожигания отходящих газов контролируются технологическим персоналом визуально (наличие пламени, засоренность горелочного устройства, цвет и характер пламени). Оперативная оценка



герметизации также осуществляется посредством обхода и регистрации состояния каждого электролизера (регламентная обработка, обвал корки, утечка анодных газов через неплотности укрытия, работа без технологических отклонений). Оснащение оборудования индивидуальными средствами контроля затруднено из-за конструктивных особенностей, а также химически агрессивного характера и высокой температуры рабочей среды. Построение подобной системы наблюдения требует установки большого количества однотипных датчиков, разработки алгоритмов сбора и анализа данных, а от персонала – обеспечения чистоты рабочей поверхности приемных устройств, что неминуемо влечет повышение трудозатрат. Таким образом, для получения информации предпочтительно использовать камеры технического зрения и далее проводить анализ полученных изображений: так, наличие утечек анодных газов может быть выявлено посредством попиксельного сравнения серии изображений с последующим распознаванием областей интереса (поток газа).

Существует технология применения красного шлама (КШ) в качестве поглотителя токсичных соединений серы, содержащихся в промышленных газах, что составляет альтернативу дорогостоящему известняку, его высокая поглотительная способность обусловлена отношением суммы оксидов кальция, магния и алюминия к оксиду кремния [12]. КШ также имеет высокую поглотительную способность по отношению к соединениям фтора, которые выделяются в больших количествах в процессе производства алюминия и являются основной проблемой на участках с электролизерами Содерберга. Главная задача состоит в предварительной подготовке его к отгрузке потребителю, из-за щелочной составляющей материал непригоден для использования в большинстве отраслей. Но в качестве поглотительного средства вредных примесей из промышленных газов он используется в первоначальном состоянии, не нуждающемся в энергозатратной подготовке. Для удобства транспортировки по шламопрово-

ду пульпу КШ разбавляют до достижения Ж:Т=5:1, что представляет собой продукт, готовый к отгрузке потребителю [13].

Многочисленными исследованиями показано, что влияние загрязняющих веществ на организм человека и окружающую среду зависит от концентрации их в воздухе. В связи с этим с целью исключения воздействия загрязняющих выбросов алюминиевого производства в развитых странах существуют различного рода законодательства, ограничивающие концентрацию загрязняющих веществ в воздушной среде. При этом используется, в основном, два подхода: ограничение выбросов загрязняющих веществ на 1 т алюминия (удельные выбросы) и ограничение концентрации загрязняющих веществ в воздухе, влекущее за собой ограничение валовых выбросов. За рубежом наиболее распространен первый подход, хотя в ряде стран существует и ограничение концентраций в воздухе. В развитых странах нормативы по предельным величинам удельных выбросов фторидов в атмосферу зависят от конкретных условий.

Характерной особенностью предприятий алюминиевой промышленности, использующих современную технологию производства первичного алюминия, является прямое воздействие на атмосферный воздух путем выбросов твердых и газообразных загрязняющих веществ, к значимым из которых относятся [14]:

- фтористый водород (HF) – 2 класс опасности;
- плохорастворимые неорганические фториды – 2 класс опасности;
- оксид алюминия – 2 класс опасности;
- бенз(а)пирен – 1 класс опасности;
- сернистый ангидрид – 3 класс опасности;
- монооксид углерода – 2 класс опасности;
- диоксид углерода – 4 класс опасности;
- пыль неорганическая (до 20% SiO₂) – 3 класс опасности.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Организация мониторинга нарушений герметизации посредством системы технического зрения для обеспечения своевременной корректировки технологических параметров и повышения управляемости процесса при снижении влияния человеческого фактора.

2. Найти возможности использования КШ в качестве поглотителя HF на участке очистки газов от электролизеров с анодом Содерберга взамен традиционно используемого глинозема.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Правилами установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями (ГОСТ 17.2.3.02-78¹) определены следующие предельно допустимые концентрации (ПДК) для фтористых компонентов, содержащихся в выбросах электролитического производства алюминия (табл. 1) [15].

Применение на современных алюминиевых заводах инновационных высокоамперных технологий не может полностью снять экологические проблемы и решить вопросы ресурсосбережения, однако позволяет улучшить условия труда в корпусе электролиза за счет отсутствия выделения смолистых веществ. Проблемой остаются выбросы перфторуглеродов CF_4 и C_2F_6 во время анодного эффекта, и в предэффектном состоянии – C_4F_{12} .

HF образуется преимущественно в результате гидролиза фторсолей при взаимодействии их с влагой, попадающей в электролит с сырьем (глиноземом, анодной массой). Образующиеся фториды в электролизерах классифицируются как газообразные и твердые. Под «выбросами фтора» понимается сумма фторидов, которые

удаляются из корпуса и загрязняют окружающую среду. Газообразными фторидами называются те фториды, которые продолжают оставаться в виде газов при температуре окружающей среды: HF, CF_4 , C_2F_6 и SiF_4 . К твердым фторидам относятся Na_3AlF_6 , $Na_5Al_3F_{14}$, AlF_3 , CaF_2 . Твердые фториды образуются вследствие процессов испарения их из электролита, а также при увлечении в систему газоотсоса мелкодисперсных твердых материалов из электролита, при питании глиноземом и с корки электролита во время выделения газов. Значительная часть из них уходит с газами, образующимися в процессе электролиза (CO , CO_2). Практически все выделяющиеся фториды улавливаются в газоочистительных установках (ГОУ), где используется в качестве активного адсорбента металлургический глинозем. Из реактора-адсорбера вторичный глинозем подается обратно на корку электролита для восполнения потерь фторидов и улавливания летучих компонентов (фторида алюминия, фтористого водорода, сероводорода и др.). На выделение фторидов из электролизеров оказывают влияние несколько факторов:

- техническое состояние электролизеров (качество укрывного материала, эффективность систем газоотсоса и доставки газа в ГОУ);
- величина перегрева электролита (при увеличении температуры возрастает количество образующихся газов);
- устройство реактора (нагнетательный агрегат, адсорбер с кипящим слоем);
- конструкция газосборного укрытия электролизеров;
- обслуживание электролизеров (питание фторсолями, глиноземом, контроль состава электролита, замена анодов);
- физико-химические свойства глинозема (удельная площадь поверхности, поте-

¹ГОСТ 17.2.3.02-78. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями. Введ. 24.08.78. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам № 2329; изм. 01.01.80. М.: Изд-во стандартов, 2004. / GOST 17.2.3.02-78. Protection of Nature. Atmosphere. Regulations for establishing permissible emissions of harmful substances by industrial enterprises. Introduced 24 August 1978. Decree of the USSR State Committee for Standards No. 2329; revised 1 January 1980. M.: Publishing house of Standards, 2004.



ри при прокаливании, химический состав, внешняя и межкристаллическая влага);

– условия окружающей среды (атмосферное давление, температура и влажность воздуха).

Фторид алюминия является одной из самых важных компонентов расплава в производстве алюминия и влияет на технико-экономические показатели процесса электролиза. Цена 1 т фторида алюминия составляет более 5500 \$ при его удельном расходе 22–23 кг на 1 т алюминия-сырца. Для того чтобы достигнуть планового выхода по току, необходимо поддерживать в ванне уровень фтора 10–14%. Фторид алюминия во время электролиза расходуется по четырем основным балансовым статьям: реакция с примесями глинозема, реакции гидролиза, благодаря которым об-

разуется газообразный HF, твердые частицы фторидов, испарение и увлечение в систему газоотсоса твердых частиц AlF_3 с поверхности расплава. Модель образования фторидов, которую Хаупин и Кванде описывали в своих работах [16–18], показывает содержание фтора (кг F/т Al или г F/кг Al). Существует две формы выделений фторидов – газообразный HF и твердый фторид (NaAlF_4), которые непрерывно выделяются из расплава во время процесса электролиза. Эти газы удаляются из-под укрытия электролизера в систему ГОУ, а после заданной степени насыщения фторированный глинозем возвращается обратно в электролизер в виде вторичного глинозема. В табл. 2 представлены основные источники образования фторидов [19].

Таблица 1

Предельно допустимая концентрация для фторидов, содержащихся в выбросах от электролизеров Содерберга, мг/м³

Table 1

Maximum permissible concentration for fluoride emissions from Søderberg cells, mg/m³

Вещество	ПДК, м.р. (максимально разовая)	ПДК, с.с. (среднесуточная)
Фтористый водород (в пересчете на F)	0,50	0,10
Соли фтористоводородных кислот в пересчете на F (фториды алюминия, магния, кальция)	2,50	0,50

Таблица 2

Источники образования фторидов в электролизерах Содерберга

Table 2

Sources of fluoride formation in Søderberg cells

№	Источники образования фторидов	Количество, %
1	Выделение с газами за счет отверстий в корке	12
2	Выделение за счет взаимодействия фтора с водородом анода	14
3	Испарение NaAlF_4	8
4	Выделения за счет пыления (вторичные потери)	6
5	Al_2O_3 с адсорбированными фторидами и влагой	13
6	Выделения, сорбируемые «сухой» газоочисткой	18
7	Выделение HF за счет взаимодействия фтора с влагой глинозема	8
8	Выделение HF за счет растворенной влаги	6
9	Выделение HF из-за потока воздуха через укрытие	15

Образование HF из водорода в угольном аноде из паров воды является первичным образованием данного соединения (рис. 1). Электролизные газы насыщаются газообразными фторидами (NaAlF_4 , $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{F}_8$, NaF), когда они охлаждаются и конденсируются, летучие компоненты переходят в твердофазное состояние. Влага, которая всегда содержится в глиноземе (внутренняя и внешняя поглощенная) и водород (как компонент влаги) в анодах реагируют с фторидами электролита с образованием фтористого водорода (первичное образование HF). Жидкие капли электролита увлекаются потоком воздуха, остывают и затвердевают, из-за влаги воздуха часть твердых фторидов подвергается гидролизу с образованием фтористого водорода (вторичный HF) [20, 21].

Отходящие газы электролитического производства алюминия в ваннах с анодом Содерберга содержат в своем составе вредные для окружающей среды не только газообразные вещества (фтористый водород, диоксид серы, моно- и диоксид углерода), но и также выделения в виде твердых веществ – глиноземной пыли и смолистых веществ, которые необходимо улавливать. В реакторе-адсорбере в режиме аэрозвеси происходит процесс соединения фтористого водорода с глиноземом [22].

4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существующие контрольно-измерительные средства не обеспечивают АСУТП полной информацией о значениях технологических параметров, поскольку автоматическое непрерывное измерение осуществляется только для показателей рабочего напряжения и тока.

Одним из возможных методов обеспечения АСУТП информацией о ходе процесса электролиза является установка в наиболее уязвимых (с точки зрения выбросов газообразных веществ) местах газоанализаторов, регистрирующих изменение состава атмосферного воздуха в цехе вследствие утечек газа и позволяющих вы-

явить факт разгерметизации электролизера без указания причин, ее вызвавших. Системы, основанные на применении индивидуальных средств контроля, требуют наличия большого количества однотипных датчиков, установленных на каждую единицу оборудования, что влечет к повышению трудозатрат по их обслуживанию. Внедрение системы технического зрения является более прогрессивным методом организации регистрации состояния оборудования, поскольку она способна оценивать такие косвенные показатели хода технологического процесса как характер и цвет пламени в горелочном устройстве, наличие пламени, засоренность горелочного устройства, обвал корки, утечка анодных газов через неплотности укрытия [23, 24]. Простейшим способом обеспечения АСУТП информацией является применение светового барьера в качестве регистрирующего устройства. С течением времени увеличивается разница (искажение S , %) в спектре излучаемого датчиком светового пучка, что свидетельствует о повышении уровня загазованности (C , %) (рис. 2).

Недостатком этого метода является то, что система не фиксирует всех возможных состояний технологического процесса.

Для получения информации предпочтительно использовать комплекс камер технического зрения и выполнять анализ изображений. Метод мониторинга с помощью комплекса камер демонстрирует неоспоримые преимущества и эффективность в обслуживании. На рис. 3 приведена предлагаемая схема автоматизированного мониторинга на участке с электролизерами Содерберга. Система технического зрения осуществляет индивидуальный контроль электролизеров-представителей ($K1$) и коллективный контроль всех электролизеров серии ($K2$). Этот метод решает всевозможные задачи визуального контроля по регистрации изменений состояния технологического процесса.

Индивидуальный контроль заключается в оснащении электролизеров-представителей камерами технического зрения и последующей обработке изобра-

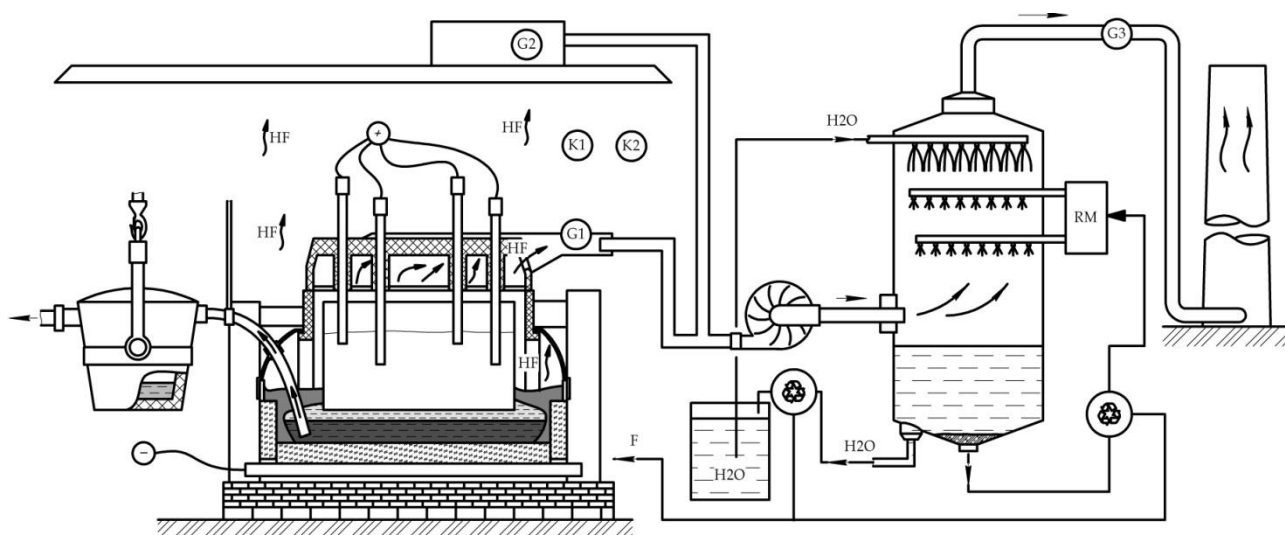


Рис. 1. Схема очистки электролизных газов от фторидов
Fig. 1. Diagram of electrolysis gas purification from fluorides

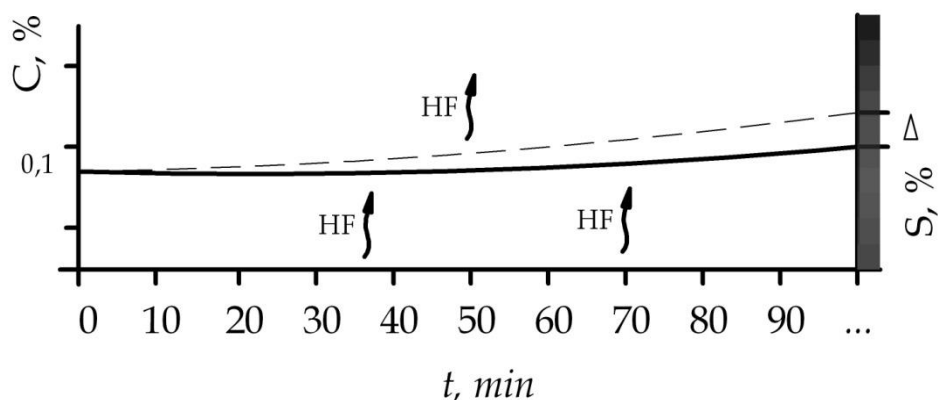


Рис. 2. График зависимости искажения спектра пучка датчика от времени при фиксированной концентрации фторидов в потоке газа
Fig. 2. Graph of sensor harness spectrum distortion vs time at a fixed concentration of fluorides in the gas flow

жений: распознавание в области интереса объектов «поверхность горелочного устройства», «пылевые отложения», «пламя» и анализ их площади и взаимного расположения. Степень засоренности может быть определена (в %) от площади воздухозаборной щели горелочного устройства, поскольку объекты «пламя» и «поверхность горелочного устройства» обладают достаточной контрастностью, а площадь воздухозаборной щели заведомо известна. Характер пламени оценивается как изменение с течением времени площади объекта «пламя». Дополнительным критерием оценки служит сравнение площади этого объекта со значением площади воздухозаборной щели горелочного устройства: пре-

вышение этого значения сигнализирует о том, что пламя выбивается из воздухозаборной щели. Оттенок пламени также подлежит анализу: пламя имеет фиолетовый оттенок – технологический процесс протекает без нарушений; пламя белого или желтого оттенка – наблюдается нарушение теплового режима электролизера.

Наличие утечек анодных газов (K2) может быть выявлено посредством попиксельного сравнения серии изображений с последующим распознаванием областей интереса (потоков газа). На рис. 4 в нижнем ряду показано выявление нестационарной области на изображении, что свидетельствует о фиксации изменения состояния технологического процесса.



Рис. 3. Схема автоматизированного мониторинга на участке электролизеров Содерберга
Fig. 3. Diagram of automated monitoring on the site of Söderberg cells

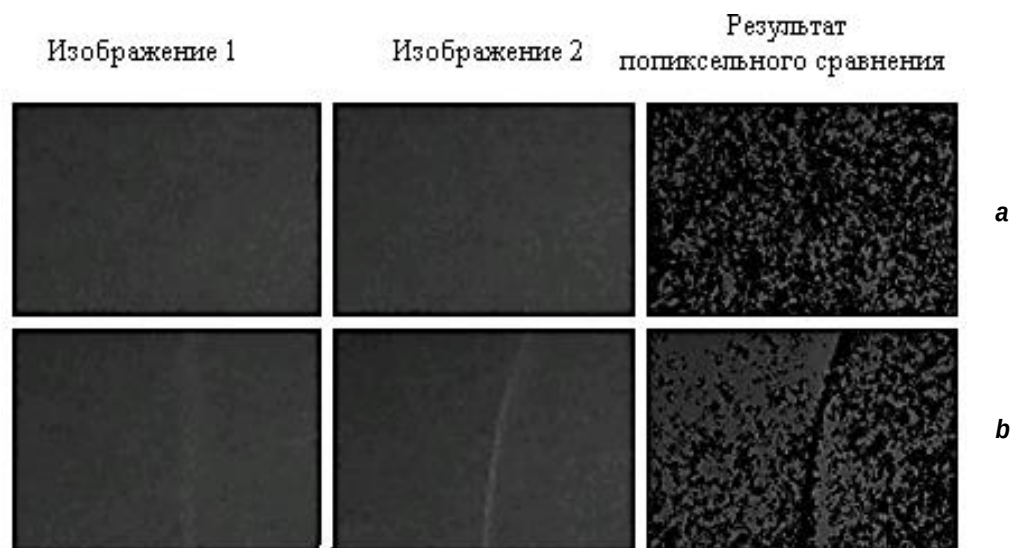


Рис. 4. Попиксельное сравнение изображений: а – отсутствие потока газа; b – наличие потока газа
Fig. 4. Pixel-by-pixel image comparison: a –no gas flow; b – gas flow

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 5 приведен график средней поглотительной способности фтора, где линия 1 показывает сорбционную способ-

ность при АСУТП с использованием в качестве поглотительного материала КШ, а линия 2 демонстрирует повышение сорбционной способности при обычной организации процесса получения алюминия. Как



видно из рис. 5, степень образования HF на 15% меньше при использовании КШ, чем при традиционном использовании глинозема с его возвратом в электролизер. Необходимый баланс фтора и других компонентов в процессе электролиза обеспечивается за счет использования КШ, что позволяет сократить объемы образования твердых отходов.

Пусковое газосборное укрытие позволяет полностью ликвидировать выбросы вредных веществ в атмосферу, а также уменьшает расход фтористых солей за счет сбора отходящих газов и транспортировки их в системы газоходов и устройства «сухой» газоочистки, что улучшает экологическую обстановку и снижает расходы на пуск электролизеров.

Использование системы автоматизированной очистки от фторидов обеспечивает снижение потерь основного сырья, что

позволяет сократить расходы на заводах производства алюминия только на 2–4%.

Система камер технического зрения заменяет визуальный контроль, осуществляемый периодически обслуживающим персоналом, что дает возможность автоматически регистрировать визуальные признаки, характеризующие ход технологического процесса (табл. 3).

Размер площади удельной поверхности зависит от наличия пор и микротрещин, а также от дефектности кристаллов. Величина BET тесно связана с другими свойствами глинозема. Высокая удельная поверхность приводит к большой гигроскопичности глинозема и, как следствие, к увеличению образования HF и росту удельного расхода фторида алюминия [25]. Чем выше удельная поверхность, тем лучше адсорбционная способность глинозема.

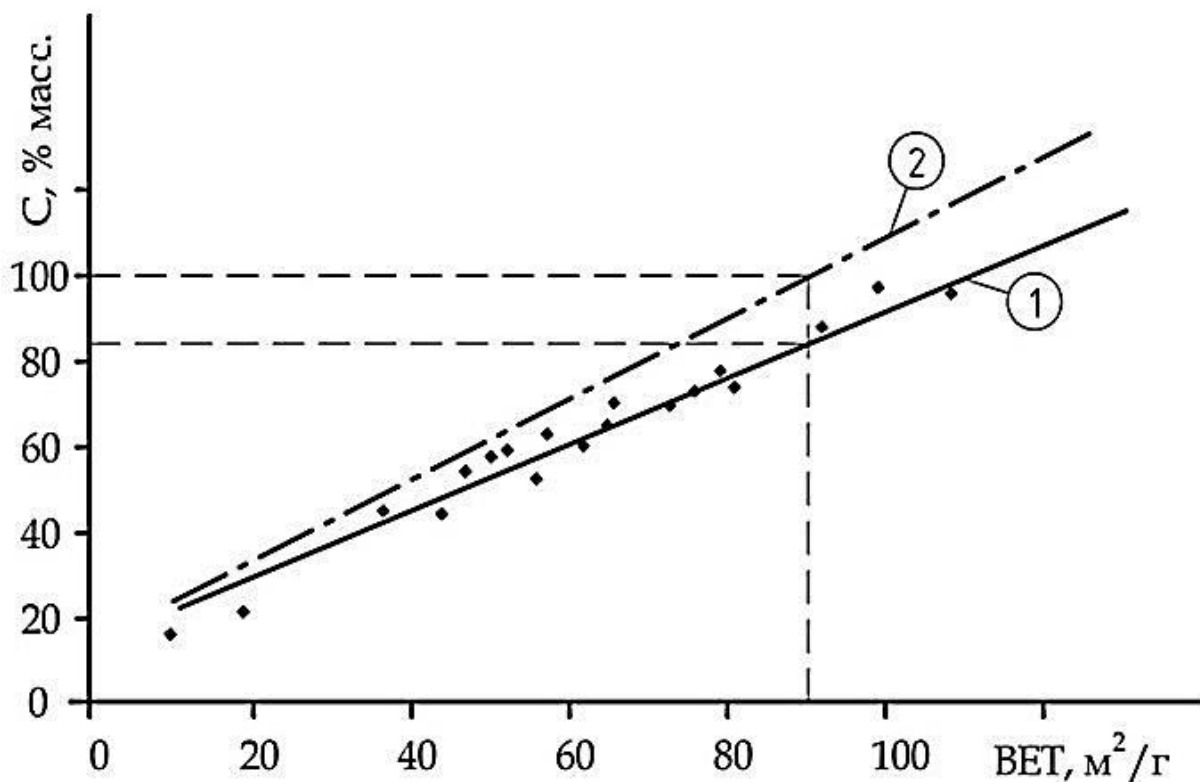


Рис. 5. График средней поглотительной способности фтора в зависимости от величины удельной поверхности по методу Брунауэра-Эммета-Теллера (BET-поверхности): 1 – при организации процесса с автоматизированным мониторингом; 2 – при обычной организации процесса

Fig. 5. Graph of the average absorptive capacity of fluorine as a function of the specific surface value according to the Brunauer-Emmett-Teller method (BET-surface): 1 – at process organization with automated monitoring; 2 – at normal process organization

Таблица 3

Визуальные признаки и возможность их регистрации

Table 3

Visual signs and their recording possibility

Визуальные признаки		Состояние технологического процесса	Возможность регистрации		
			Газоанализатор	Фотодиод	Камера технического зрения
Горелочное устройство	наличие пылевых отложений		-	-	+
	пламя имеет фиолетовый оттенок	технологический процесс без нарушений	-	+	+
	пламя имеет желтый или белый оттенок	нарушение теплового баланса электролизера	-	+	+
	пламя выбивается через воздухозаборные щели	нарушения в системе газоотсоса	-	+	+
	пламя отсутствует		-	-	+
Поверхность электролита	утечка газа через неплотности газосборного колокольного укрытия	нарушение герметизации	+	-	+
	обвалы корки		+	-	+

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве поглотительного материала для фторидов целесообразно использовать красный шлам, который является заменителем глинозема, применяемого в настоящее время.

Использование комплекса камер технического зрения и алгоритмов анализа изображений позволит:

- более полно обеспечивать АСУТП информацией;
- вести технологический процесс

без отклонений и аварийных ситуаций;

- прогнозировать наступление анодного эффекта;

- оценивать состояние горелочных устройств и условия дожигания отходящих газов (наличие пламени, засоренность горелочного устройства, цвет пламени, характер пламени);

- оперативно оценивать степень герметизации электролизера.

В целом, это позволит получить положительный эколого-экономический эффект.

Библиографический список

1. Буркат В.С. Измерение эмиссии перфторуглеродов (CF_4 , C_2F_6) от электролизеров при электролитическом получении алюминия // Цветные металлы. 2014. № 7. С. 49–53.
2. Sørli M. Temperature Stability of Søderberg Anode Pitch // Light Metals. 2007. P. 239–247
3. Chase R., Gibson R., Marks J. PFC emissions per-

formance for the global primary aluminium industry // Light Metals. 2005. P. 279–282.

4. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Somov V.V. Study of Influence of Parameters of Leaching Fluorine from Spent Pot Lining // Materials Science Forum. 2019. Vol. 946. P. 552–557. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.552>



5. Taylor M.P., Johnson G.L., Andrews E.W., Welch B.J. The Impact of Anode Cover and Anode Assembly Design on Reduction Cell Performance // *Light Metals*. 2004. P. 199–206.
6. Бажин В.Ю., Власов А.А., Лупенков А.В. Управление анодным эффектом на алюминиевом электролизере // *Металлург*. 2011. № 5. С. 89–93.
7. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The First Results of the Industrial Application of the EcoSoderberg Technology at the Krasnoyarsk Aluminium Smelter // *Light Metals*. 2013. P. 573–576. DOI: 10.1002/9781118663189.ch98
8. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В., Сомов В.В. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. № 1. С. 19–30. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30
9. Куликов Б.П. Наилучшие доступные технологии как способ решения экологических задач ОК «РУСАЛ» // *Цветные металлы и минералы-2016: сб. тез. докладов VIII Междунар. конгресса (г. Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.)*. Красноярск, 2017. С. 100–101.
10. Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Ребрик И.И. Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга. Красноярск: Изд-во СФУ, 2010. 145 с.
11. Громыко А.И., Зограф Ф.Г. Повышение достоверности диагностики технологических нарушений процесса электролиза алюминия // *Цветные металлы*. 2006. № 5. С. 87–89.
12. Трушко В.Л., Утков В.А., Бажин В.Ю. Актуальности и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // *Записки горного института*. 2017. Т. 227. С. 547–553. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.547
13. Утков В.А. Переработка красных шламов // *Ресурсосберегающие и природозащитные технологии в производстве глинозема, алюминия, магния и сопутствующей продукции: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 13–16 октября 2006 г.)*. Санкт-Петербург, 2006. С. 323–325.
14. Арбузов В.А., Исанова Б.Х., Белякова М.О. Очистка дымовых газов ТЭЦ от оксидов серы и азота // *Литье и металлургия*. 2009. № 3 (52). С. 99–103.
15. Сенник А.И., Милюков С.В., Прошкина О.Б. Образование выбросов сероводорода при внешней грануляции доменных шлаков // *Вестник Московского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2008. № 3. С. 75–79.
16. Кванде Х. Минимизация углеродосодержащих выбросов алюминиевых заводов // *Цветные металлы и минералы-2017: сб. докладов IX Междунар. конгресса (г. Красноярск, 11–15 сентября 2017 г.)*. Красноярск, 2017. С. 195–197.
17. Kvande H., Drablos P.A. The Aluminium Smelting Process and Innovative Alternative Technologies // *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2014. Vol. 56. No. 5. P. 23–32. DOI: 10.1097/JOM.0000000000000062
18. Keller R. Alumina dissolution and sludge formation revised // *Light Metals*. 2005. P. 147–150.
19. Wang X. Alumina Dissolution in Aluminum Smelting Electrolyte // *Light Metals*. 2009. P. 383–389.
20. Andrews E.W., Taylor M.P., Johnson G.L., Coad I. The Impact of Anode Cover Control and Anode Assembly Design on Reduction Cell Performance // *Light Metals*. 2005. Part 2. P. 357–363.
21. Gudmundsson H. Improving anode cover material quality at Nordural – quality tools and measures // *Light Metals*. 2009. P. 467–472.
22. Slaugenhaupt M.L., Bruggeman J.N., Tarcy G.P., Dando N.R. Effect of open holes in the crust on gaseous fluoride evolution from pots // *Light Metals*. 2003. P. 199–204.
23. Дулдиер А.П. Цветовые характеристики пламени как показатель качества сжигания топлива // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* Одесса: ОНМА. 2004. Вып. 9. С. 31–36.
24. Tessier J., Duchesne C., Dufour G. Image Analysis for Estimations of Anode Cover Material Composition // *Light Metals*. 2008. P. 293–298.
25. Vlasov A.A., Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu. The modern systems of automatic alumina feeding for aluminum production // *Scientific Reports of Resource Germany*. 2010. Vol. 3. P. 331–332.

References

1. Burkat V.S. Measurement of perfluorocarbon emissions (CF_4 , C_2F_6) from the electrolytic cells in the electrolytic production of aluminum. *Cvetnye metally* [Non-ferrous Metals], 2014, no. 7, pp. 49–53.
2. Sørli M. Temperature Stability of Søderberg Anode Pitch. *Light Metals*, 2007, pp. 239–247.
3. Chase R., Gibson R., Marks J. PFC emissions performance for the global primary aluminium industry. *Light Metals*, 2005, pp. 279–282.
4. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Somov V.V. Study of influence of parameters of leaching fluorine from spent pot lining. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 946, pp. 552–557. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.552>.
5. Taylor M.P., Johnson G.L., Andrews E.W., Welch B.J. The impact of anode cover and anode assembly design on reduction cell performance. *Light Metals*, 2004, pp. 199–206.
6. Bazhin V.Yu., Vlasov A.A., Lupenkov A.V. Control of anode effect at aluminium pot. *Metallurg* [Metallurgist], 2011, no. 5, pp. 89–93. (In Russ.).
7. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The first results of the industrial application of the EcoSoderberg technology at the Krasnoyarsk Aluminium Smelter. *Light Metals*, 2013, pp. 573–576. DOI: 10.1002/9781118663189.ch98

8. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., Somov V.V. Increasing covering efficiency of Soderberg cells. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Cvetnaya metallurgiya* [Proceedings of Higher Schools Nonferrous Metallurgy], 2017, no 1, pp. 19–30. (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30
9. Kulikov B.P. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii kak sposob resheniya ekologicheskikh zadach OK «RUSAL»* [The best available technologies as a way to solve environmental problems of UC RUSAL]. *Sbornik tezisev dokladov VIII mezhdunarodnogo Kongressa "Cvetnye metally i mineraly-2016"* [Abstracts of reports of VIII International Congress "Non-ferrous metals and minerals-2016", Krasnoyarsk, 13–16 September, 2016]. Krasnoyarsk, 2017, pp. 100–101. (In Russ.).
10. Shakhrai S. G., Korostovenko V.V., Rebrik I.I. *Sovershenstvovaniye sistem kolokol'nogo gazootsosa na moshchnykh elektrolizerakh Soderberga*. [Improving bell gas pump systems on powerful Soderberg cells]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ., 2010, 145 p. (In Russ.).
11. Gromyko A. I., Zograf F.G. Increase of reliability of diagnostics of technological deteriorations in aluminium electrolysis process. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous Metals], 2006, no. 5, pp. 87–89. (In Russ.).
12. Trushko V. L., Utkov V. A., Bazhin V.Yu. Relevance and possibility of complete processing of red slurries of alumina production. *Zapiski gornogo instituta*. [Journal of Mining Institute], 2017, vol. 227, pp. 547–553. (In Russ.). DOI: 10.25515/PMI.2017.5.547
13. Utkov V.A. *Pererabotka krasnyh shlamov* [Red mud processing]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Resursosberegayushchie i prirodoshchitnye tekhnologii v proizvodstve glinozema, alyuminiya, magniya i soputstvuyushchej produkcii"* [Proceedings of International scientific and practical conference "Resource-saving and environmentally-friendly technologies in the production of alumina, aluminum, magnesium and by-products", Saint Petersburg, 13–16 October 2006]. Saint Petersburg, 2006, pp. 323–325. (In Russ.).
14. Arbuzov V.A., Isanova B.X., Belyakova M.O. *Ochistka dymovykh gazov teplovykh elektrocentralej ot oksidov sery i azota* [Purification of the heat-electric generating station flue gases of sulfur and nitrogen oxides]. *Litiye i metallurgiya*. [Foundry Production and Metallurgy], 2009, no. 3 (52), pp. 99–103. (In Russ.).
15. Senik I. A., Milyukov, S. V., Proshkina O. B. Formation of hydrogen sulphide emissions at blast-furnace slag outer granulation. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.N. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 3, pp. 75–79. (In Russ.).
16. Kvande H. *Minimizaciya uglerodosoderzhashchih vybrosov alyuminievyh zavodov* [Minimization of carbon-containing emissions of aluminum plants]. *Sbornik dokladov IX Mezhdunarodnogo kongressa "Cvetnye metally i mineraly-2017"* [Collected reports of IX International Congress "Non-Ferrous Metals and Minerals 2017", Krasnoyarsk, 11–15 September 2017]. Krasnoyarsk, 2017, pp. 195–197. (In Russ.).
17. Kvande H., Drablos P.A. The aluminium smelting process and innovative alternative technologies. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2014, vol. 56, no. 5, pp. 23–32. DOI: 10.1097/JOM.0000000000000062
18. Keller R. Alumina dissolution and sludge formation revised. *Light Metals*, 2005, pp. 147–150.
19. Wang X. Alumina dissolution in aluminum smelting electrolyte. *Light Metals*, 2009, pp. 383–389.
20. Andrews E.W., Taylor M.P., Johnson G.L., Coad I. The impact of anode cover control and anode assembly design on reduction cell performance. *Light Metals*, 2005, part 2, pp. 357–363.
21. Gudmundsson H. Improving anode cover material quality at Nordural – quality tools and measures. *Light Metals*, 2009, pp. 467–472.
22. Slaugenhaupt M.L., Bruggeman J.N., Tarcy G.P., Dando N.R. Effect of open holes in the crust on gaseous fluoride evolution from pots. *Light Metals*, 2003, pp. 199–204.
23. Duldier A.P. *Cvetovye harakteristiki plameni kak pokazatel' kachestva szhiganiya topliva* [Color characteristics of flame as a quality indicator of fuel combustion]. *Avtomatizaciya sudovykh tekhnicheskikh sredstv: nauchno-tekhnicheskij sbornik* [Automation of ship technical devices: collected scientific and technical papers]. Odessa: ONMA Publ., 2004, issue 9, pp. 31–36.
24. Tessier J., Duchesne C., Dufour G. Image analysis for estimations of anode cover material composition. *Light Metals*, 2008, pp. 293–298.
25. Vlasov A.A., Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu. The modern systems of automatic alumina feeding for aluminum production. *Scientific Reports of Resource Germany*, 2010, vol. 3, pp. 331–332.

Критерии авторства

Комарова Т.Ю., Кульчицкий А.А., Лебедев А.Б., Бажин В.Ю. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Komarova T.Yu., Kulchitsky A.A., Lebedev A.B., Bazhin V.Yu. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Комарова Татьяна Юрьевна,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
e-mail: komaroff.t@yandex.ru

Кульчицкий Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации технологических
процессов и производств,
Санкт-Петербургский горный университет
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
e-mail: doz-ku@rambler.ru

Лебедев Андрей Борисович,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
✉ e-mail: 2799957@mail.ru

Бажин Владимир Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов и производств, декан
факультета переработки минерального сырья,
Санкт-Петербургский горный университет
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,
21-я линия, 2, Россия;
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana Yu. Komarova,
Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Vasilievsky ostrov,
Saint Petersburg, 199106, Russia;
e-mail: komaroff.t@yandex.ru

Alexander A. Kulchitsky,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Automation
of Technological Processes and Production,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Vasilievsky ostrov, Saint Petersburg,
199106, Russia;
e-mail: doz-ku@rambler.ru

Andrei B. Lebedev,
Postgraduate,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Vasilievsky ostrov, Saint Petersburg,
199106, Russia;
✉ e-mail: 2799957@mail.ru

Vladimir Yu. Bazhin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Automation of Technological
Processes and Production,
Dean of the Faculty of Mineral Processing,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21 Line, Vasilievsky ostrov, Saint Petersburg,
199106, Russia;
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru



Математическое моделирование процесса гидрометаллургической переработки демонтированной угольной футеровки алюминиевых электролизеров

© В.В. Сомов*, Н.В. Немчинова*, В.А. Бычинский****

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

**Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

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

Резюме: Цель – изучение методом математического (физико-химического) моделирования процесса гидрометаллургической переработки угольной части отработанной футеровки демонтированных катодных устройств алюминиевых электролизеров. Оценка методом термодинамического анализа (на основе построенной модели влияния концентрации раствора каустической соды ($\text{NaOH} - \text{Na}_2\text{O}_{\text{кв}}$) и соотношения жидкой и твердой фаз) на извлечение фтора в раствор. Математическое моделирование выщелачивания фтора из образцов отработанной футеровки проводилось на основе изучения физико-химических закономерностей процесса с использованием программного комплекса «Селектор», основанного на минимизации энергии Гиббса и широко используемого для изучения металлургических процессов. Объектом исследований являлась проба угольной отработанной футеровки алюминиевого электролизера ОАО «РУСАЛ Красноярск». По данным рентгенофазового анализа фторсодержащими фазами в образце выступают криолит Na_3AlF_6 , хиолит $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$, фторид кальция CaF_2 , фторид натрия NaF . Кроме данных компонентов, в исследуемом углеродсодержащем материале зафиксированы также Si, Fe, Mg, S, K, Ti. Выполнена оценка поведения компонентов угольной отработанной футеровки в процессе щелочной переработки при воздействии на нее раствора с концентрацией $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кв}}$ 12,5, 17,5 и 25,0 г/дм³ с помощью сформированной математической модели. Согласно решению модели, наилучшие показатели по извлечению фтора в раствор (72,9–90,57%) были достигнуты с концентрацией реагента по $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кв}}$ 12,5, 17,5 г/дм³ и отношении жидкого к твердому 10÷12:1. С помощью модели удалось установить необходимое количество щелочного раствора для извлечения фтора и оптимальное соотношение жидкой и твердой фаз. Также установлен фазовый состав кека и формы, в которых фтор остается в твердом остатке (кеке).

Ключевые слова: производство алюминия, электролизер, катодное устройство, отработанная футеровка, извлечение фтора, выщелачивание

Информация о статье: Дата поступления 12 июня 2019 г.; дата принятия к печати 15 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 августа 2019 г.

Для цитирования: Сомов В.В., Немчинова Н.В., Бычинский В.А. Математическое моделирование процесса гидрометаллургической переработки демонтированной угольной футеровки алюминиевых электролизеров. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(4):829–843. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-829-843

Mathematical modeling of hydrometallurgical processing of dismantled carbon pot lining of aluminum reduction cells

Vladimir V. Somov, Nina V. Nemchinova, Valerii A. Bychinskii

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is using the method of mathematical (physico-chemical) modeling to study hydrometallurgical processing of spent carbon pot lining of dismantled cathodes from aluminum reduction cells; using the method of thermodynamic analysis, which is based on the built model of the influence of caustic soda solution concentration ($\text{NaOH} - \text{Na}_2\text{O}_{\text{кв}}$) and liquid and solid phases ratio to estimate fluorine extraction to solution. Mathematical modeling of fluorine leaching from spent pot lining samples is carried out on the basis of studying the physicochemical laws of the process using the «Selector» program complex based on the minimization of Gibbs energy and is widely used for metallurgical process study. The object of research is a sample of spent carbon pot lining of the aluminum reduction cell of

RUSAL Krasnoyarsk OJSC. According to the X-ray phase analysis the fluorine-containing phases in the sample are cryolite Na_3AlF_6 , chiolite $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$, calcium fluoride CaF_2 , sodium fluoride NaF . Besides, Si, Fe, Mg, S, K, Ti are also found in the carbon-containing material under investigation. The behavior of the components of the spent carbon pot lining is evaluated in the process of alkaline processing under the action of the solution with $\text{Na}_2\text{O}_{\text{K}}$ concentration of 12.5, 17.5 and 25.0 g/dm³ using the formed mathematical model. According to the model the best indicators of fluorine extraction into the solution (72.9–90.57%) have been achieved at the reagent concentration of 12.5, 17.5 g/dm³ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{K}}$ and the liquid to solid ratio of 10–12:1. The developed model allows to determine the amount of alkaline solution necessary for fluorine extraction and the optimal ratio of liquid and solid phases. The phase composition of cake and forms in which fluorine remains in solid residue (cake) are also determined.

Keywords: aluminum production, reduction cell, cathode, spent pot lining, fluorine extraction, leaching

Information about the article: Received June 12, 2019; accepted for publication July 15, 2019; available online August 31, 2019.

For citation: Somov V.V., Nemchinova N.V., Bychinskii V.A. Mathematical modeling of hydrometallurgical processing of dismantled carbon pot lining of aluminum reduction cells. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(4):829–843. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-829-843

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс электролитического получения алюминия электролизом криолит-глиноземных расплавов является единственным промышленным способом получения данного металла^{1,2} [1]. Однако он сопровождается образованием значительного количества фторуглеродсодержащего техногенного сырья³ [2], складываемого в настоящее время на шламовых полях и лишь частично возвращаемого в процесс электролиза или реализуемого стороннему потребителю [3–5]. Самым крупнотоннажным видом отхода производства является отработанная футеровка электролизеров (ОФЭ), состоящая из угольной и огнеупорной частей [6]. Химический состав ОФЭ очень разнообразный, зависит от практики эксплуатации ванн, криолитового отношения, применяемых сырья и материалов катодных блоков, срока службы электролизеров [2, 7]. Частично ОФЭ реализуется в

производстве чугуна, цемента, однако большая часть складывается на специально отведенных полигонах [8–11].

Согласно ранее проведенным аналитическим исследованиям химического состава угольной части ОФЭ ОАО «РУСАЛ Красноярск» компании РУСАЛ, основными соединениями, содержащими фтор, являются криолит, хиолит, фториды натрия и кальция [12]. Как известно, данные соединения (кроме флюорита CaF_2) активно взаимодействуют с раствором каустика, при этом удается максимально перевести фтор в раствор [13, 14].

Для оценки термодинамической (ТД) вероятности протекания реакций взаимодействия компонентов угольной ОФЭ с раствором каустической соды (NaOH – $\text{Na}_2\text{O}_{\text{K}}$) целесообразнее использовать методы математического моделирования, основанные на знаниях о физико-химических закономерностях протекания тех или иных реакций [15]. В наших исследованиях мы ис-

¹Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. Электрометаллургия алюминия и магния: учебник для вузов. М.: Metallurgy. 1987. 320 с. / Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkolnikov S.N. Electrometallurgy of aluminium and magnesium: textbook for universities. M.: Metallurgy Publ., 1987, 320 p. / Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkolnikov S.N. Electrometallurgy of aluminium and magnesium: textbook for universities. M.: Metallurgy Publ., 1987, 320 p.

²Гринберг И.С., Зельберг Б.И., Чалых В.И., Черных А.Е. Электрометаллургия алюминия: учеб. пособ. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 427 с. / Greenberg I.S., Zellberg B.I., Chalykh, V.I., Chernykh A.E. Electrometallurgy of aluminium: Learning aids. Irkutsk: ISTU press, 2009, 427 p.

³Немчинова Н.В., Шумилова Л.В., Салхофер С.П., Размахнин К.К., Чернова О.А. Комплексное устойчивое управление отходами. Металлургическая промышленность: учеб. пособ. М.: ИД «Академия Естествознания», 2016. 494 с. / Nemchinova N.V., Shumilova L.V., Salkhofer S.P., Razmakhnin K.K., Chernova O.A. Integrated sustainable waste management. Metallurgical industry: Learning aids. Moscow, Academy of Natural Sciences Publ., 2016, 494 p.



пользовали программный комплекс (ПК) «Селектор», широко применяемый для изучения металлургических процессов (основан на минимизации энергии Гиббса при расчете гетерогенных равновесий) [16].

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ПК «Селектор» был разработан в 1973 г. профессором Карповым И.К. и предназначен для решения геохимических задач. С помощью данной программы предоставлялась возможность использовать мультисистему (к которой можно отнести любой металлургический процесс) с любым набором фаз и применять критерии равновесия при расчете ТД модели [16].

Структура ПК «Селектор» включает в себя следующие блоки:

1) системы баз данных (БД) – стандартные БД компонентов водного раствора, газов, жидких углеводородов, расплавов, твердых веществ и минералов;

2) блок формирования моделей – список потенциально возможных процессов и условий, в зависимости от которых выбирается один из ТД потенциалов;

3) расчет модели – настройка модели согласно выбранному сценарию;

4) обработка результатов – автоматизирование работы по структурированию и выбору необходимой информации, а также отображение в табличном виде (Grafer, Microsoft Excel и др.).

Благодаря сверхточным расчетам и верному подходу к реализации того или иного численного эксперимента, с помощью ПК «Селектор» можно производить сложнейшие расчеты химических равновесий в различных условиях: изобарно-изотермических, изохорических, адиабатических. При этом в многомерных системах одновременно могут присутствовать: водный раствор электролита, газовая смесь, жидкие и твердые углеводороды, минералы в виде твердых растворов и однокомпонентных фаз, расплавы и др. [17].

ПК «Селектор» нашел широкое применение для моделирования различных металлургических процессов [18]. Напри-

мер, при изучении теоретических аспектов электроплавки серебросодержащих концентратов Дукатского ГОКа⁴, выявлении путей улучшения качества алюминиево-кремниевых лигатур (система «Al-Si-Fe-Ca-Ti-Na-Mg-Mn-O-H-C-N») ⁵, изучении поведения компонентов при карботермическом получении кремния в руднотермических печах и его рафинировании⁶ [19, 20], исследовании процесса получения кремния из окомкованной шихты на основе техногенного сырья [21], моделирования восстановления железа и цинка при переработке пылей электросталеплавильного производства [21]. В области гидрометаллургической переработки золотосодержащих руд и концентратов ПК «Селектор» активно используется при изучении процессов автоклавного окисления упорных сульфидных золотосодержащих руд и различных типов флотоконцентратов⁷, а также при разработке технологий сверхтонкого измельчения руд драгоценных металлов [22].

В области электрометаллургии алюминия также широко используются возможности ПК «Селектор»: изучены свойства компонентов электролита, построены модели отдельных переделов – производства глинозема, электролитического получения алюминия, регенерации фтористых солей. Так, авторами работы [23] ПК «Селектор» использовался при исследовании вопросов оптимизации состава криолит-глиноземного электролита по температуре его плавления и летучести компонентов. С этой целью была создана модель реального расплава системы « $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2\text{-MgF}_2\text{-LiF}$ ».

Авторы [24] с помощью методов ТД моделирования исследовали возможные пути конверсии белитового шлама в устойчивый в гипергенных условиях минеральный парагенезис, изменяющий физическую структуру шлама и снижающий его фильтрационные свойства. Установлено, что уменьшение фильтрационных утечек достигается за счет образования клинкерных минералов (карбоалюминатов и тоберморита), формирующихся при использовании микродисперсного кольматанта, пригото-

ленного на основе аморфного SiO_2 . В качестве сырья для получения кольматантов возможно применение мелкодисперсной пыли кремниевого производства с «сухих» циклонов системы газоочистки.

С использованием ПК «Селектор» был выполнен расчет равновесия всех возможных реакций взаимодействия компонентов в процессе шихтоподготовки глиноземного производства [25]. Ввод в сырьевую известняково-нефелиновую шихту добавок шлаков ферротитанового производства приводил к появлению в системе соединений хрома, содержащихся в шлаке. Результатами промышленных испытаний показано, что Cr при выщелачивании спека переходит в нефелиновый шлам, не оказывает влияния на технологический процесс и не загрязняет товарные продукты.

При изучении процессов регенерации ценных компонентов авторами работы [26] на основе моделирования с помощью ПК «Селектор» доказана возможность синтеза низкомодульных фторалюминатов с использованием растворов газоочистки и фторалюминиевых кислот. Физико-химический анализ наиболее характерных химических реакций, выполненный на основании справочных и уточненных ТД данных, позволил предположить, что в структуру фторалюминатов входит определенное количество Na^+ и различных по составу ионов фторалюминиевых кислот, которые обладают относительной устойчивостью в

кислотной среде. Расчет и моделирование физико-химических процессов показали, что при взаимодействии фторалюминиевой кислоты и фторида натрия равновесная концентрация соединений фтора в растворе уменьшается с 20–25 до 1,0–1,5 г/кг H_2O .

Также в работе [27] исследованы химико-технологические особенности применения фтористых соединений в производстве алюминия. Методом моделирования уточнены режимы и параметры технологических процессов, существенно снижающие выбросы вредных веществ. Модернизированы методы получения фтористых солей и оптимизации их химического и гранулометрического составов. Разработаны мероприятия по совершенствованию электролиза криолит-глиноземных расплавов, обеспечивающие снижение потерь ценных компонентов.

В основу работы [28] положен метод компьютерного моделирования, позволяющий имитировать технологические процессы алюминиевого производства. Расчет компонентного состава и параметров отдельных систем в состоянии полного или метастабильного равновесия сводится к задаче минимизации ТД потенциалов. Полученная модель позволяет поддерживать баланс технологических компонентов в процессе электролиза и оптимизировать состав сырья и электролита с целью устранения влияния примесей и сокращения выбросов вредных веществ.

⁴Седых В.И. Научные и практические основы рациональной технологии переработки серебросодержащих концентратов по комбинированной обогатительно-металлургической схеме: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. Иркутск, 2001. 40 с. / Sedykh V.I. Scientific and practical foundations of a rational technology for processing silver-containing concentrates by a combined concentration and metallurgical scheme: The author's abstract of Doctoral Dissertation in technical sciences. Irkutsk. 2001. 40 p.

⁵Тупицын А.А. Совершенствование технологии получения алюминиево-кремниевых лигатур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.03. Иркутск, 1995. 21 с. / Tupitsyn A.A. Improving technology of aluminum-silicon ligature production: The author's abstract of Candidate's Dissertation in technical sciences. Irkutsk. 1995. 21 p.

⁶Елисеев И.А. Моделирование высокотемпературных процессов рафинирования высокочистого металлургического кремния как сырья для выращивания мультикремния для солнечной энергетики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Улан-Удэ, 2005. 21 с. / Eliseev I.A. Modeling of high-temperature refining processes of high purity metallurgical silicon as a raw material for polysilicon growing for solar energy: The author's abstract of Candidate's Dissertation in technical sciences. Ulan-Ude. 2005. 21 c.

⁷Епифоров А.В. Низкотемпературное автоклавное окисление упорных, сульфидных золото-медных флотоконцентратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Иркутск, 2014. 144 с. / Epiforov A.V. Low temperature autoclave oxidation of refractory, sulfide gold-copper flotation concentrates: Candidate's Dissertation in technical sciences. 05.16.02. Irkutsk. 2014. 144 p.



В работе [29] авторами рассмотрены проблемы переработки отходов алюминиевого производства (в частности, утилизация угольной электролитной пены, перерабатываемой по модернизированной технологии). В случае высокой степени разделения фаз с получением углеродсодержащего кека и фторсодержащего раствора (с примесью Al_2O_3) прекращается сброс хвостов флотации, возможна утилизация запасов техногенного сырья шламовых полей.

На основании систематизации технологических групп техногенных отходов алюминиевого производства по содержанию углерода авторами работы [30] предложены эффективные методы их переработки и утилизации. Исследована технология серноокислотного разложения отходов во вращающейся печи с кислотоупорной футеровкой, позволяющая выделить HF, необходимый для фторирования глинозема, и утилизировать вторичный вид сырья – смесь сульфатов Na и Al. Выделенные компоненты могут быть использованы при регенерации фтористых соединений и по-

лучении сырьевых добавок для производства глинозема и алюминия.

Решение поставленных задач в конкретном технологическом процессе подразумевает обязательное прохождение всей технологической цепочки компьютерного моделирования: теоретическое обоснование и математическая постановка, создание эффективных алгоритмов и рабочих программ, имитационные эксперименты, демонстрация возможности новых подходов на результатах изучения процессов с помощью моделей.

3. ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЩЕЛОЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГОЛЬНОЙ ОТРАБОТАННОЙ ФУТЕРОВКИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

Процесс формирования математической модели процесса выщелачивания фтора основывается на алгоритме разработки концептуальной модели процесса. Данный алгоритм представлен на рис. 1.

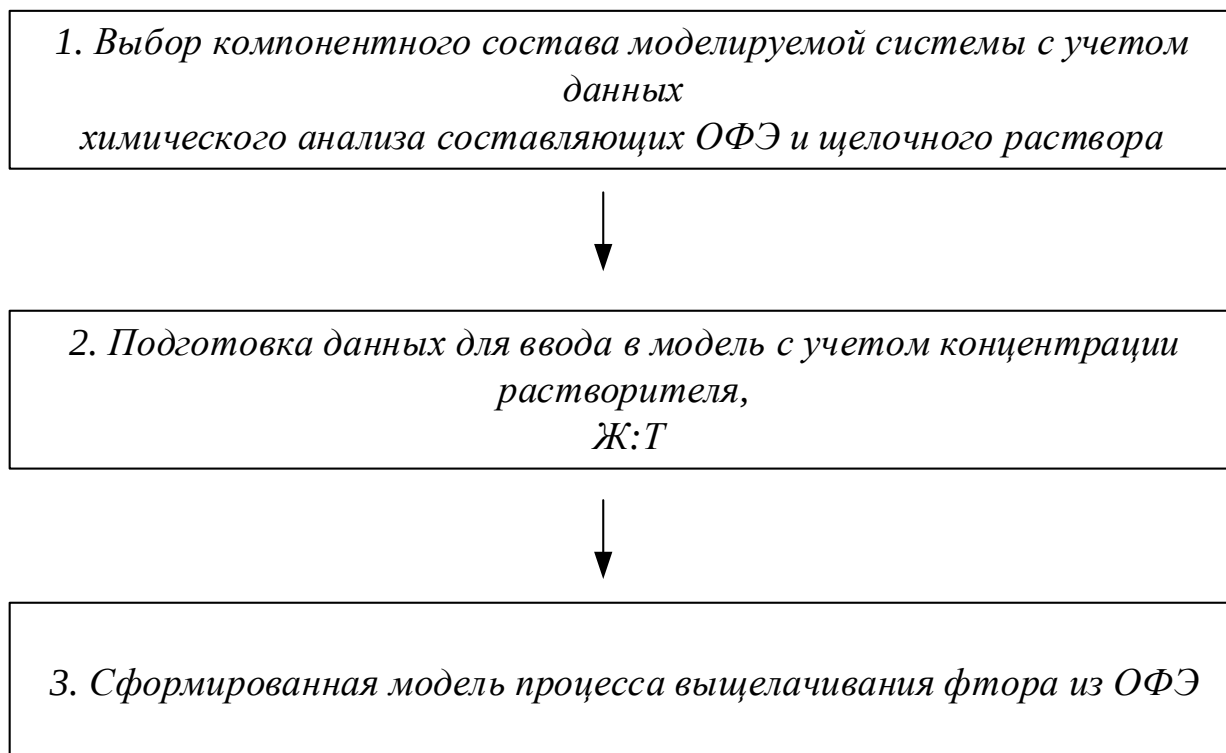


Рис. 1. Алгоритм формирования математической модели
Fig. 1. Mathematical model formation algorithm

В построенной математической модели представлено взаимодействие двух фаз гетерогенной системы: угольной части ОФЭ (твердое) и растворителя (жидкое). Основной задачей физико-химического моделирования являлось определение оптимальных условий извлечения фтора (как ценного компонента) из ОФЭ. С помощью сформированной модели выполнена оценка поведения компонентов угольной ОФЭ в процессе щелочной переработки при воздействии на нее раствором каустической соды с концентрацией $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кы}}$ 12,5, 17,5 и 25,0 г/дм³.

С учетом данных химического состава средней пробы угольной ОФЭ нами был определен набор независимых компонентов: C, F, Na, Al, Si, Fe, Ca, Mg, O, S, K, Cl, Ti. Их содержание в % масс. было пересчитано в моли для ввода в модель.

Также в модели присутствует N как компонент воздуха и H как компонент щелочного раствора. При построении модели процесса ТД свойства компонентов системы были взяты из БД, имеющихся в ПК «Селектор»: g_janaf.DB, g_Yokokawa.DB, g_Reid.DB, s_RobieHemingway.DB, s_sprons98.DB [31, 32].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью ПК «Селектор» проведено математическое моделирование процесса на основе физико-химических зако-

номерностей взаимодействия компонентов ОФЭ с раствором едкого натра различной концентрации. Для жидкой фазы решалось три задачи с концентрацией $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кы}}$: 12,5, 17,5 и 25,0 г/дм³.

Поскольку в реальных условиях процесс растворения контролируется кинетическими параметрами и протекает медленно, в математической модели рассмотрено постепенное вступление компонентов ОФЭ во взаимодействие с растворителем. Для каждого из 3 вариантов модельных экспериментов (с применением растворителя различной концентрации) рассмотрено по 47 вариантов состава пульпы выщелачивания.

На первом этапе исследовалось влияние массового соотношения жидкого к твердому в пульпе (100 г футеровки, 1000 г H_2O и 25 г NaOH). Каждое следующее решение в этой модели содержит на 1 г больше твердого при постоянном количестве щелочного раствора.

Согласно результатам моделирования, основными компонентами нерастворимого остатка гидрометаллургической переработки ОФЭ (кека) являются графит (C), глинозем (Al_2O_3), флюорит (CaF_2), нефелин ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), фторид магния (MgF_2), ульвешпинель (Fe_2TiO_4) (рис. 2). В незначительном количестве присутствуют пирит (FeS_2), альбит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), кварц (SiO_2), виллиомит (NaF), титаномагнетит ($\text{Fe}(\text{Fe}_{1,24}\text{Ti}_{0,61})\text{O}_4$), карбонаты (преимущественно MgCO_3).

Таблица 1

**Химический состав пробы угольной отработанной футеровки
(с учетом перевода в моли для ввода в модель)**

Table 1

**Chemical composition of the sample of carbon spent pot lining
(including conversion to moles to be input in the model)**

Компонент	C	F	Na	Al	Ca	Si	K
Содержание, % масс.	50,35	17,51	16,44	6,77	2,01	1,49	0,73
Содержание, моль	4,19234	0,921676	0,715094	0,250908	0,050152	0,053053	0,018671
Компонент	O	S	Fe	Cl	Mg	Ti	
Содержание, % масс.	2,11	0,86	0,33	0,10	0,65	0,06	
Содержание, моль	0,131883	0,02682	0,005909	0,002821	0,026743	0,001253	

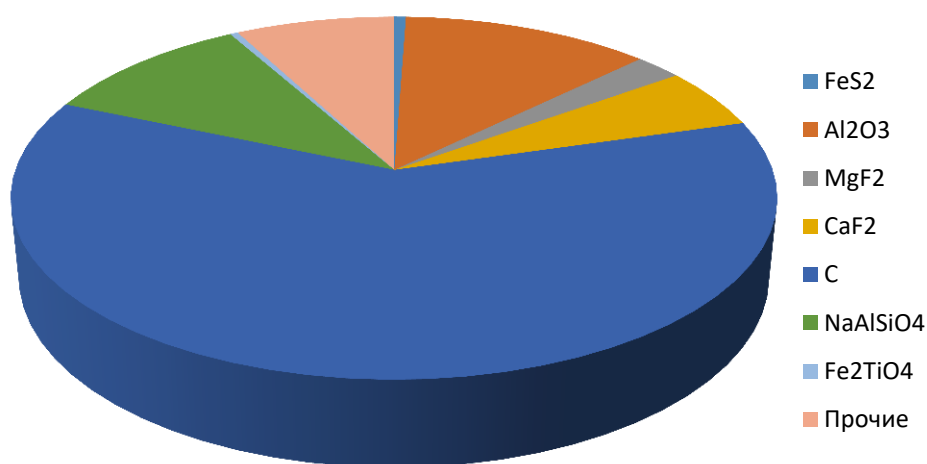


Рис. 2. Фазовый состав кека выщелачивания (согласно модели)
Fig. 2. Leach cake phase composition (according to the model)

По мере увеличения массы футеровки (твердого) в модельных экспериментах количество основных составляющих кека также возрастает (рис. 3 а). Главными ионами в щелочном растворе являются $\text{Al}(\text{OH})_2\text{F}^{2-}$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, Na^+ , NaF^0 , F^- , HSiO_3^- .

Следовательно, степень извлечения фтора контролируется главным образом соотношением количества фтора и натрия в системе. Поскольку Na содержится как в исходном щелочном растворе, так и в ОФЭ, то при увеличении количества вступившей в химическое взаимодействие со щелочным раствором ОФЭ его содержание быстро достигает равновесного состояния, и образуется виллиомит, связывающий фтор. Поэтому, несмотря на то что общее количество фтора в системе становится больше, степень его извлечения снижается (рис. 3 б). Увеличение соотношения Ж:Т выше, чем 10:1,2 снижает эффективность выщелачивания F. Следует особо отметить, что увеличение количества твердого в системе почти не сказывается на образовании других фторсодержащих соединений, таких как CaF_2 и MgF_2 . Общее извлечение F по модели при использовании раствора с 25,0 г/дм³ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кк}}$ составило 58,10–82,28%.

Поэтому на следующем этапе был исследован процесс выщелачивания фтора из ОФЭ растворами с более низким содер-

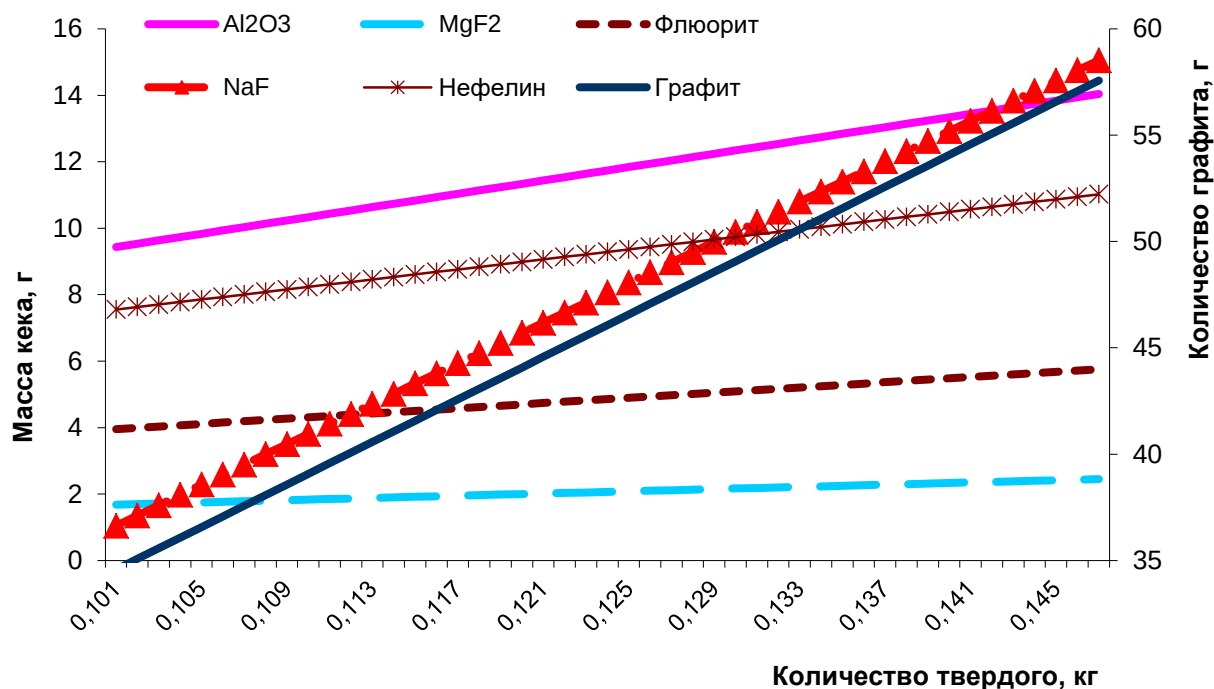
жанием $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кк}}$ (100 г твердого, 1000 г H_2O и 17,5 г NaOH). Качественно фазовый состав кека не изменился (рис. 4 а), преобладающими компонентами остаются графит, оксид алюминия, виллиомит. Однако их соотношение меняется. Становится больше графита, меньше Al_2O_3 , а виллиомит образуется на более поздних стадиях в существенно меньших количествах, что подтверждает наше предположение о существовании оптимального отношения жидкого к твердому в пульпе. Степень извлечения F в данном варианте модели снижается, а на первых стадиях взаимодействия – выше (рис. 4 б).

При использовании растворителя с концентрацией $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кк}}$ 17,5 г/дм³ извлечение фтора в раствор (согласно модели) составило 68,89–84,7%, что также является достаточно высоким показателем (см. рис. 4 б).

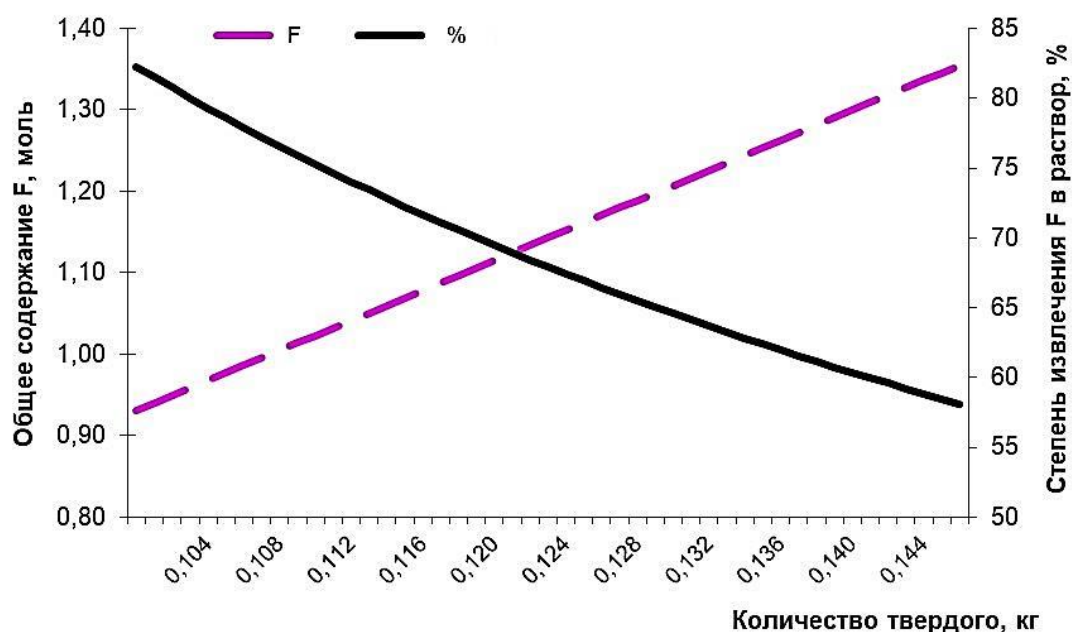
Снижение количества $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кк}}$ в растворителе до 12,5 г/дм³ (рис. 5) позволяет увеличить степень извлечения фтора до 80,54–84,39% и подобрать оптимальные условия для его извлечения. Качественно фазовый состав кека остается неизменным, общее количество графита возрастает, т.к. в связи с увеличением растворимости алюминия количество Al_2O_3 в кеке снижается, виллиомит образуется только на за-

вершающих стадиях выщелачивания (рис. 5 а). Степень извлечения F становится

максимальной (84,39%) и до соотношения Ж:Т= 10:1,37 не меняется (рис. 5 б).



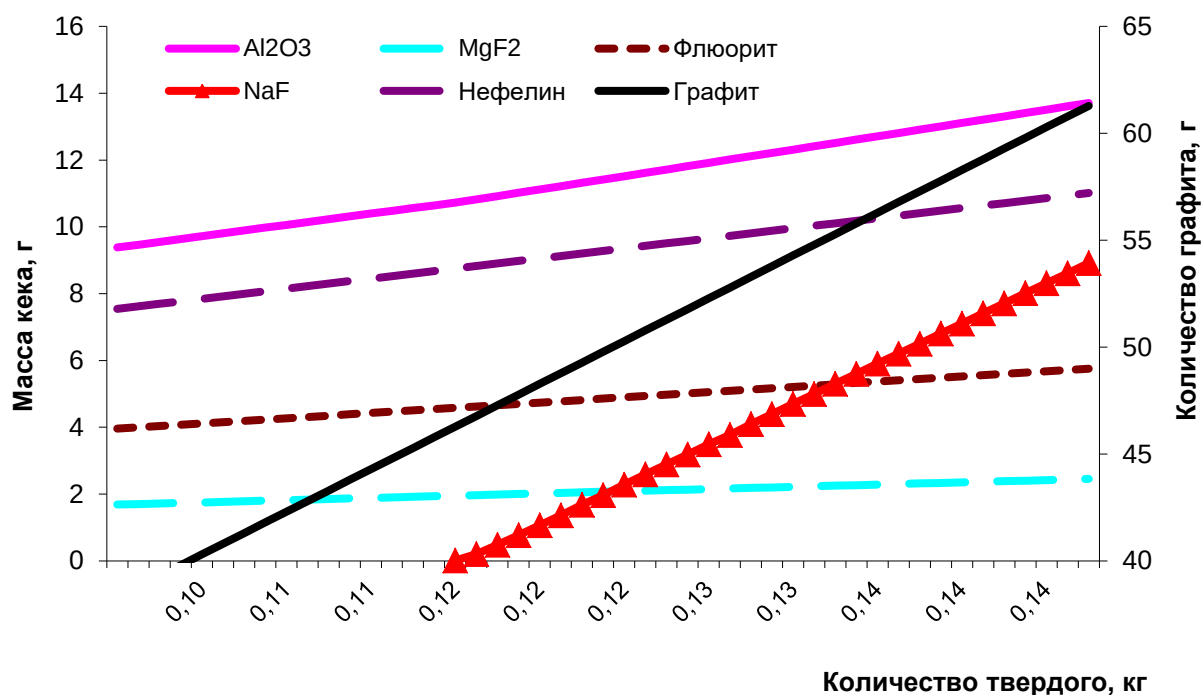
a



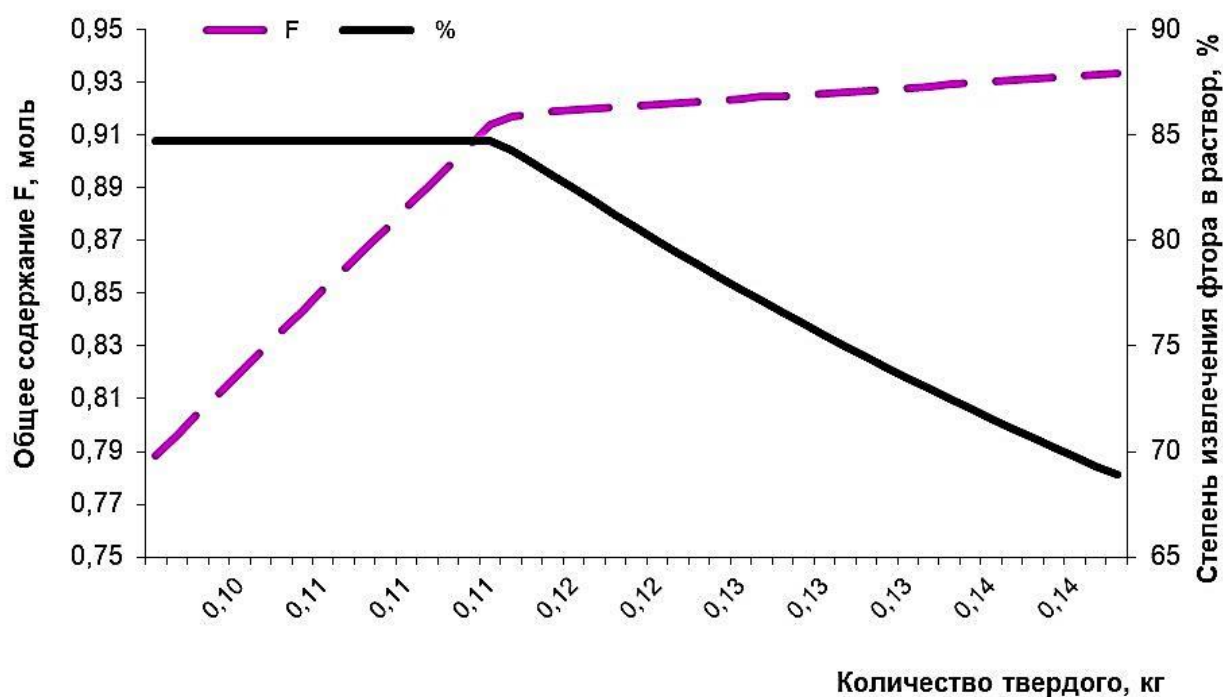
b

Рис. 3. Результаты моделирования для варианта с концентрацией щелочи 25,0 г/дм³:
 а – изменение содержания основных компонентов в твердой фазе, б – изменение содержания фтора
 с изменением количества твердой фазы, извлечение фтора

Fig. 3. Modeling results for the variant with alkali concentrations of 25.0 g/dm³: а – variations in main component contents in the solid phase, б – fluorine content variations depending on solid phase amount change, fluorine extraction

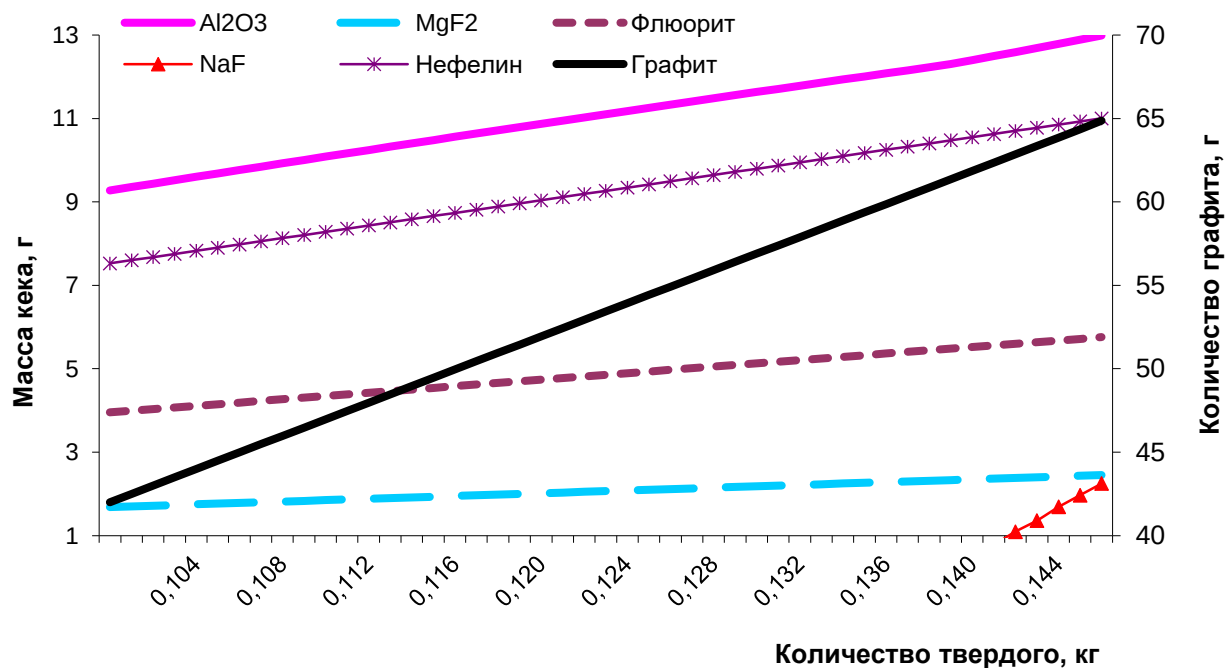


a

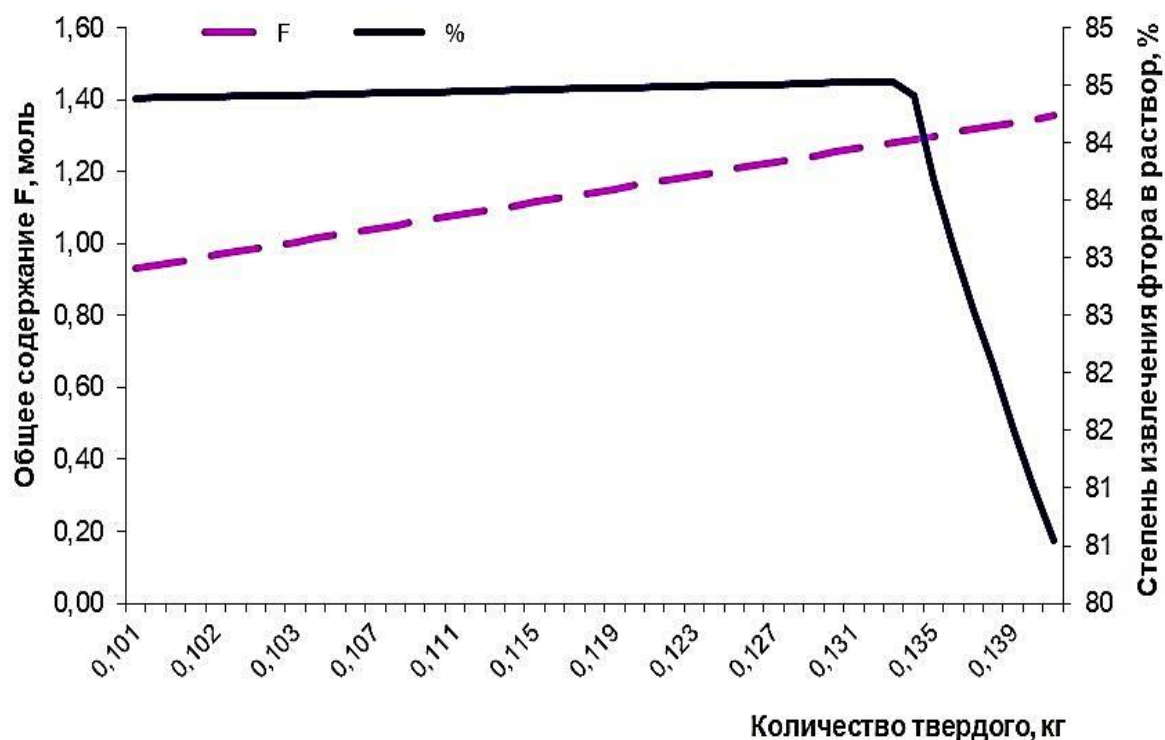


b

Рис. 4. Результаты моделирования для варианта с концентрацией щелочи $17,5 \text{ г/дм}^3$:
а – изменение содержания основных компонентов в твердой фазе, б – изменение содержания фтора с изменением количества твердой фазы, извлечение фтора
Fig. 4. Modeling results for the variant with alkali concentrations of 17.5 g/dm^3 : a – variations in main component contents in the solid phase, b – fluorine content variations depending on solid phase amount change, fluorine extraction



a



b

Рис. 5. Результаты моделирования для варианта с концентрацией щелочи $12,5 \text{ г/дм}^3$:
 а – изменение содержания основных компонентов в твердой фазе, б – изменение содержания фтора
 с изменением количества твердой фазы, извлечение фтора

Fig. 5. Modeling results for the variant with alkali concentrations of 12.5 g/dm^3 : a – variations in main component contents in the solid phase, b – fluorine content variations depending on solid phase amount change, fluorine extraction



Таким образом, результаты математического моделирования процесса выщелачивания фтора из ОФЭ на основе физико-химических закономерностей позволяют сделать важный вывод о том, что оптимальное содержание $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кв}}$ в растворе определяется количеством натрия в пробе футеровки, следовательно, для каждого состава щелочность раствора подбирается индивидуально. Для данного химического состава ОФЭ показано, что в растворах с содержанием $\text{Na}_2\text{O}_{\text{кв}}$ выше $18,0 \text{ г/дм}^3$ растворимость фтора, а, следовательно, степень его извлечения, снижается.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы переработки футеровки демонтированных катодных устройств алюминиевых электролизеров являются актуальными, поскольку необходимо извлекать ценные компоненты из нее (в частности, фтор) для получения фтористых солей, востребованных в процессе электролиза. Кроме того, решается и экологическая проблема: снижение количества складированного на шламовых полях техногенного сырья. Одним из способов переработки угольной ОФЭ является гидрометаллургический способ с использованием раствора каустической соды в качестве реагента.

На основе моделирования с помо-

щью ПК «Селектор» нами была создана математическая модель процесса выщелачивания, позволяющая изучить влияние концентрации растворителя и соотношения жидкой и твердой фаз при гидрометаллургической переработке угольной части демонтированных алюминиевых электролизеров.

Для моделирования было выбрано 3 концентрации растворителя: 12,5, 17,5 и $25,0 \text{ г/дм}^3 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{кв}}$. Наилучшие показатели по извлечению фтора в раствор были достигнуты при концентрации реагента $12,5 \text{ г/дм}^3$ и Ж:Т=10÷12:1. С помощью ТД модели удалось установить необходимое количество раствора NaOH для извлечения фтора и оптимальное соотношение Ж:Т. Также установлен фазовый состав кека и формы, в которых фтор остается в твердом остатке (кеке).

Следующим этапом исследований является проведение экспериментальных работ по максимальной степени выщелачивания фтора из ОФЭ щелочью выбранных концентраций и подбору оптимальных условий процесса с целью получения растворов, пригодных для получения вторичного криолита по традиционной содобикарбонатно-алюминатной схеме, востребованного в процессе электролиза криолит-глиноземного расплава.

Библиографический список

1. Grjotheim K., Welch B. Aluminium Smelter Technology. Dusseldorf: Aluminium Verlag, 1993. 260 p.
2. Куликов Б.П., Истомин С.П. Переработка отходов алюминиевого производства. Красноярск: Классик Центр, 2004. 480 с.
3. Flores I.V., Fraiz F., Lopes Junior R. A., Bagatini M.C. Evaluation of spent pot lining (SPL) as an alternative carbonaceous material in ironmaking processes // Journal of Material Research and Technology. 2019. Vol. 8. Issue 1. P. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.11.004>
4. Nemchinova N.V., Yakushevich P.A., Yakovleva A.A., Gavrilenko L.V. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting // Metallurgist. 2018. Vol. 62. Issue 1–2. P. 150–155. DOI: 10.1007/s11015-018-0637-7
5. Баранов А.Н., Гавриленко Л.В., Моренко А.В., Тимкина Е. В., Якушевич П.А. Производство фторида кальция из твердых и жидких отходов процесса получения алюминия // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2015. № 4. С. 468–474.
6. Sørlie M., Øye H. Cathodes in Aluminium Electrolysis (3rd edition). Dusseldorf: Aluminium-Verlag. 2010. 662 p.
7. Haiying Liu, Jinling Wang, Shifu Shen, Youfa Luo. Study on process mineralogy of a used cathode of carbon block from electrolytic aluminum factory // Procedia Environmental Sciences. 2012. Vol. 16. P. 749–757. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.102
8. Zhao Xia, Ma Lei. Hazardous waste treatment for spent pot liner // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. 108. 042023 DOI: 10.1088/1755-1315/108/4/042023
9. Patrin R.K., Bazhin V.Yu. Spent Linings from Aluminium Cells as a Raw Material for the Metallurgical, Chemical, and Construction Industries // Metallurgist. 2014. Vol. 58, Issue. 7–8. P. 625–629.

DOI: 10.1007/s11015-014-9967-2

10. Kruger P.V. Use of Spent Potlining (SPL) in Ferro silico manganese Smelting // *Light Metals*. 2011. P. 275–280. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118061992.ch49>

11. Holywel G., Breault R. An Overview of Useful Methods to Treat, Recover, or Recycle Spent Potlining // *JOM*. 2013. Vol. 65. Issue 11. P. 1441–1451. DOI: 10.1007/s11837-013-0769-y

12. Сомов В.В., Немчинова Н.В., Корепина Н.А. Аналитические методы исследования образцов отработанной футеровки алюминиевого электролизера // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2017. № 5. С. 607–612. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-5-607-620

13. Mann V., Pingin V., Zherdev A., Bogdanov Y., Pavlov S., Somov V. Recycling Process Technology for Spent Pot Lining Generated by Aluminium Cells // *Light metals*. 2017. P. 571–578. DOI: 10.1007/978-3-319-51541-0_71

14. Somov V.V., Nemchinova N.V., Tyutrin A.A. Ways of Solving the Ecological Problem of Alluminium Smelting Hard Waste Disposal // *Advances in Engineering Research*. 2019. Vol. 182. P. 216–221. DOI: <https://doi.org/10.2991/ciggg-18.2019.41>

15. Владимиров Л.П. Термодинамические расчеты равновесия металлургических реакций. М.: Металлургия, 1970. 528 с.

16. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.

17. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. 287 с.

18. Немчинова Н.В., Бельский С.С., Аксенов А.В., Васильев А.А. Использование метода минимизации свободной энергии для изучения металлургических процессов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014. № 3. С.151–158.

19. Nemchinova N.V., Timofeev A.K., Salov V.M. Effect of Charge Composition on Metallurgical Silicon Smelting Indices in Electric-Arc Furnaces // *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. Issue 11. P. 1243–1249. DOI: 10.1007/s11015-017-0435-7

20. Тютрин А.А., Тимофеев А.К. Применение методов математического моделирования при изучении процессов получения и рафинирования металлургического кремния [Электронный ресурс] // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/104-6747> (24.06.2019).

21. Патрушов А.Е., Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Чувазов Д.Н. Исследование методами математического моделирования процесса восстановления железа и цинка из пылей электросталеплавильного производства // *Переработка природного и техногенного сырья: сб. науч. тр.* Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. С. 114–116.

22. Сидоров И.А., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д., Чикина Т.В. Повышение извлечения металла

из упорных золотосульфидных флотационных концентратов на основе процесса сверхтонкого помола // *Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья «Плаксинские чтения-2014»: матер. Междунар. совещания* (Алматы (Республика Казахстан), 16–19 сентября 2014 г.). Алматы (Республика Казахстан), 2014. С. 126–127.

23. Тупицын А.А., Шеметова А.С., Седых В.И. Расчет термодинамических свойств тетрафторалюмината натрия и натрий-литиевого криолита // *Перспективы развития технологии, экологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств: материалы науч.-практ. конф.* (г. Иркутск, 13–14 апреля 2006 г.). Иркутск, 2006. С. 118–120.

24. Бычинский В.А., Шепелев И.И., Головных Н.В., Диденков Ю.Н., Тупицын А.А., Чудненко К.В. Исследование способов сокращения дренажей сточных вод из шламохранилищ в подземные и речные воды методами физико-химической активации белитового шлама // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2007. № 4. С. 33–37.

25. Шепелев И.И., Головных Н.В., Чудненко К.В., Сахачев А.Ю. Физико-химическое моделирование процессов глиноземного производства при использовании техногенных добавок // *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф.* (г. Екатеринбург, 10–13 апреля 2018 г.). Екатеринбург, 2018. С. 213–217.

26. Головных Н.В., Бычинский В.А., Филимонова Л.М., Чудненко К.В., Шепелев И.И. Повышение эффективности систем газоочистки в алюминиевом производстве // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2017. № 3. С. 45–55. DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-45-55](https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-45-55)

27. Головных Н.В., Бычинский В.А., Филимонова Л.М., Чудненко К.В. Моделирование и сокращение потерь фторсодержащих компонентов в производстве алюминия // *Химическая технология*. 2016. Т. 17. № 2. С. 65–73.

28. Головных Н.В., Бычинский В.А., Чудненко К.В., Шепелев И.И. Термодинамические и термохимические аспекты компьютерного моделирования процессов электролиза при получении алюминия // *Цветные металлы и минералы-2015: сб. тезисов докл. Седьмого Междунар. конгресса* (г. Красноярск, 13–16 сентября 2015 г.). Красноярск, 2015. С. 371–376.

29. Головных Н.В., Швец А.А., Сахачев А.Ю., Шепелев И.И. Эколого-технологические аспекты комплексного использования природных и техногенных видов фторсодержащего сырья в алюминиевом производстве // *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы 19 Междунар. науч.-техн. конф.* (г. Екатеринбург, 23–24 апреля 2014 г.). Екатеринбург, 2014. С. 233–237.

30. Головных Н.В., Швец А.А., Сахачев А.Ю., Шепелев И.И. Разработка системных методов при переработке технологических групп отходов алюми-



вого производства // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 15–16 апреля 2015 г.). Екатеринбург, 2015. С. 112–115.

31. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // Journal of the national chem-

ical laboratory for industry. 1988. Vol. 83. P. 27–121.

32. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and 1 Bar (105 Pascals) Pressures and at Higher Temperatures. US Geological Survey Bulletin 2131: U.S. G.P.O.; For sale by U.S. Geological Survey, Information Services, 1995. 461 p. DOI: 10.3133/b2131

References

1. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to Aluminium Electrolysis. Dusseldorf Aluminium Verlag, 1993, 260 p.
2. Kulikov B.P., Istomin S.P. *Pererabotka othodov aluminievogo proizvodstva* [Processing of aluminum waste products]. Krasnoyarsk: Klassik Centr Publ., 2004, 480 p. (In Russ.).
3. Flores I.V., Fraiz F., Lopes Junior R. A., Bagatini M.C. Evaluation of spent pot lining (SPL) as an alternative carbonaceous material in ironmaking processes. *Journal of Material Research and Technology*, 2019, vol. 8, issue 1, pp. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.11.004>
4. Nemchinova N.V., Yakushevich P.A., Yakovleva A.A., Gavrilenko L.V. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting. *Metallurgist*, 2018, vol. 62, issue 1–2, pp. 150–155. DOI: 10.1007/s11015-018-0637-7
5. Baranov A.N., Gavrilenko L.V., Morenko A.V., Gavrilenko A.A., Timkina E.V., Yakushevich P.A. Production of the Calcium Fluoride from Solid and Liquid Wastes of Aluminum Production Process. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University - Engineering and technologies], 2015, vol. 4, pp. 468–474.
6. Sørlie M., Øye H. Cathodes in Aluminium Electrolysis (3rd edition). Dusseldorf: Aluminium-Verlag, 2010, 662 p.
7. Haiying Liu, Jinling Wang, Shifu Shen, Youfa Luo. Study on process mineralogy of a used cathode of carbon block from electrolytic aluminum factory. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, vol. 16, pp. 749–757. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.102
8. Zhao Xia, Ma Lei. Hazardous waste treatment for spent pot liner. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 108, 042023. DOI: 10.1088/1755-1315/108/4/042023
9. Patrin R.K., Bazhin V.Yu. Spent Linings from Aluminium Cells as a Raw Material for the Metallurgical, Chemical, and Construction Industries. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, issue 7–8, pp. 625–629. DOI: 10.1007/s11015-014-9967-2
10. Kruger P.V. Use of Spent Potlining (SPL) in Ferro silico manganese Smelting. *Light Metals*, 2011, pp. 275–280. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118061992.ch49>
11. Holywell G., Breault R. An Overview of Useful Methods to Treat, Recover, or Recycle Spent Potlining. *JOM*. 2013, vol. 65, no. 11, pp. 1441–1451.
12. Somov V.V., Nemchinova N.V., Korepina N.A. Analytical methods of researching the aluminium electroly-

- sis cell fulfilled lining samples. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University - Engineering and technologies], 2017, vol. 10(5), pp. 607–620. (In Russ.). DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-5-607-620
13. Mann V., Pingin V., Zherdev A., Bogdanov Y., Pavlov S., Somov V. SPL Recycling and Re-processing. *Light Metals*, 2017, pp. 571–578. DOI: 10.1007/978-3-319-51541-0_71
14. Somov V.V., Nemchinova N.V., Tyutrin A.A. Ways of Solving the Ecological Problem of Alluminium Smelting Hard Waste Disposal. *Advances in Engineering Research*. 2019, vol. 182, pp. 216–221. DOI: <https://doi.org/10.2991/ciggg-18.2019.41>
15. Vladimirov L.P. *Termodinamicheskiye raschety ravnovesiya metallurgicheskikh reaktsiy* [Thermodynamic calculations of metallurgical reaction equilibrium]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 528 p. (in Russ.).
16. Karpov I.K. *Fiziko-khimicheskoye modelirovaniye na EVM v geokhimii* [Physicochemical computer simulation in geochemistry]. Novosibirsk: Nauka, 1981, 247 p. (In Russ.).
17. Chudenko K.V. *Termodinamicheskoye modelirovaniye v geokhimii: teoriya, algoritmy, programnoye obespecheniye, prilozheniya* [Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications]. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”, 2010, 287 p. (In Russ.).
18. Nemchinova N.V., Belsky S.S., Aksyonov A.V., Vasilyev A.A. Using free energy minimization method for metallurgical process studies. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 3, pp. 151–158. (In Russ.).
19. Nemchinova N.V., Timofeev A.K., Salov V.M. Effect of charge composition on metallurgical silicon smelting indices in electric-arc furnaces. *Metallurgist*, 2017, vol. 60, issue 11, pp. 1243–1249. DOI: 10.1007/s11015-017-0435-7
20. Tyutrin A.A., Timofeev A.K. The mathematical modeling methods application for study of the processes of metallurgical silicon production and refining. *Sovremnyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2012. No. 4. Available at: <http://www.science-education.ru/104-6747> (accessed 24 June 2019). (In Russ.).
21. Patrushev A.E., Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Chuvashov D.N. Issledovaniye metodami matematicheskogo modelirovaniya protsessa vosstanovleniya zheleza i tsinka iz pyley elektrostaleplavil'nogo pro-

izvodstva [Study by the methods of mathematical modeling of iron and zinc recovery from electric steel production dusts]. *Sbornik nauchnykh trudov "Pererabotka prirodnogo i tekhnogennogo syr'ya"* [Processing of natural and technogenic raw materials: collected scientific works]. Irkutsk: IRNITU Publ. 2018, pp. 114–117. (In Russ.).

22. Sidorov I.A., Voiloshnikov G.I., Khmel'nitskaya O.D., Chikina T.V. Povysheniye izvlecheniya metalla iz upornykh zolotosul'fidnykh flotatsionnykh kontsentratsion na osnove protsesssa sverkh-tonkogo pomola [Improving metal recovery from refractory gold sulphide flotation concentrates based on the ultrafine grinding process]. *Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya "Progressivnyye metody obogashcheniya i kompleksnoy pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya «Plaksinskiye chteniya-2014»"* [Proceedings of the International Meeting "Progressive methods of concentration and complex processing of natural and technogenic mineral raw materials "Plaksinsky Readings-2014", Almaty (Republic of Kazakhstan), 16–19 September 2014]. Almaty (Republic of Kazakhstan), 2014, pp. 126–127. (In Russ.).

23. Tupitsyn A.A., Shemetova A.S., Sedykh V.I. Raschet termodinamicheskikh svoystv tetrafluoroaluminata natriya i natriy-litiyevogo kriolita [Calculation of thermodynamic properties of sodium tetrafluoroaluminate and sodium lithium cryolite]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivy razvitiya tekhnologii, ekologii i avtomatizatsii khimicheskikh, pishchevykh i metallurgicheskikh proizvodstv"* [Proceedings of a scientific and practical conference "Development prospects of technology, ecology and automation of chemical, food and metallurgical industries", Irkutsk, 13–14 April 2006]. Irkutsk, 2006, pp. 118–120. (In Russ.).

24. Bychinsky V.A., Shepelev I.I., Golovnykh N.V., Didenkov Yu.N., Tupitsyn A.A., Chudnenko K.V. Investigation of methods to reduce sewage water from slime storages in underground and river waters by methods of physical-chemical activation of belite slimes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*. [Proceedings of Higher Schools Nonferrous Metallurgy], 2007, vol. 4, pp. 33–37. (In Russ.).

25. Shepelev I.I., Golovnykh N.V., Chudnenko K.V., Sakhachev A.Yu. Fiziko-khimicheskoye modelirovaniye protsessov glinozemnogo proizvodstva pri ispol'zovanii tekhnogennykh dobavok [Physico-chemical modeling of alumina production processes when using technogenic additives]. *Materialy XXIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Nauchnyye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya"* [Proceedings of XXIII International scientific and technical conference "Scientific Fundamentals and Practice of Ores and Technogenic Raw Materials Processing", Ekaterinburg, 10–13 April 2018]. Ekaterinburg, 2018, pp. 213–217. (In Russ.).

26. Golovnykh N.V., Bychinsky V.A., Filimonova L.M., Chudnenko K.V., Shepelev I.I. Increasing the efficiency of gas-scrubbing systems in aluminum production.

Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya. [Proceedings of Higher Schools Nonferrous Metallurgy], 2017, no. 3, pp. 45–55. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-45-55. (In Russ.).

27. Golovnykh N.V., Bychinsky V.A., Filimonova L.M., Chudnenko K.V. Modeling and reduction of losses of fluorine-containing components in aluminum production. *Khimicheskaya tekhnologiya*. [Chemical Technology], 2016, vol. 17, no. 2, pp. 65–73. (In Russ.).

28. Golovnykh N.V., Bychinsky V.A., Chudnenko K.V., Shepelev I.I. Termodinamicheskiye i termokhimicheskiye aspekty komp'yuternogo modelirovaniya protsessov elektroliza pri poluchenii alyuminiya [Thermodynamic and thermochemical aspects of computer simulation of electrolysis processes in aluminum production]. *Sbornik tezisov dokladov Sed'mogo Mezhdunarodnogo kongressa "Tsvetnyye metally i mineraly-2015"* [Collection of abstracts of reports of the Seventh International Congress "Non-ferrous Metals and Minerals-2015", Krasnoyarsk, 13–16 September 2015]. Krasnoyarsk, 2015, pp. 371–376. (In Russ.).

29. Golovnykh N.V., Shvets A.A., Sakhachev A.Yu., Shepelev I.I. Ekologo-tekhnologicheskyye aspekty kompleksnogo ispol'zovaniya prirodnnykh i tekhnogennykh vidov ftorsoderzhashchego syr'ya v alyuminiyevom proizvodstve [Environmental and technological aspects of the integrated use of natural and technogenic types of fluorine-containing raw materials in aluminum production]. *Materialy 19 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Nauchnyye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya"* [Proceedings of 19 International Scientific and Technical Conference "Scientific Fundamentals and Practice of Ores and Technogenic Raw Materials Processing", Ekaterinburg, 23–24 April 2014]. Ekaterinburg, 2014, pp. 233–237. (In Russ.).

30. Golovnykh N.V., Shvets A.A., Sakhachev A.Yu., Shepelev I.I. Razrabotka sistemnykh metodov pri pererabotke tekhnologicheskikh grupp otkhodov alyuminiyevogo proizvodstva [Development of systemic methods when processing technological groups of aluminum production wastes]. *Materialy XX Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Nauchnyye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya"* [Proceedings of XX International Scientific and Technical Conference "Scientific Fundamentals and Practice of Ores and Technogenic Raw Materials Processing", Ekaterinburg, 15–16 April 2015]. Ekaterinburg, 2015, pp. 112–115. (In Russ.).

31. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds. Journal of the national chemical laboratory for industry. 1988, vol. 83, pp. 27–121.

32. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and 1 Bar (105 Pascals) Pressures and at Higher Temperatures. US Geological Survey Bulletin 2131: U.S. G.P.O.; For sale by U.S. Geological Survey, Information Services, 1995, 461 p. DOI: 10.3133/b2131



Критерии авторства

Сомов В.В. провел обзор по тематике исследований и подготовил исходные аналитические данные, Немчинова Н.В. проанализировала результаты моделирования, Бычинский В.А. провел исследования по компьютерному моделированию и проанализировал полученные данные. Немчинова Н.В. написала рукопись и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сомов Владимир Владимирович,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: comob-boba@yandex.ru

Немчинова Нина Владимировна,

доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой металлургии
цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Россия;
✉ e-mail: ninavn@yandex.ru

Бычинский Валерий Алексеевич

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
664033, ул. Фаворского, 1 «А», г. Иркутск, Россия;
доцент кафедры геологии нефти и газа
Иркутский государственный университет,
664003, ул. Карла Маркса, 1, г. Иркутск, Россия;
e-mail: val@igc.irk.ru

Authorship criteria

Somov V.V. conducted a review on the research topic and prepared input analytical data. Nemchinova N.V. analyzed modeling results. Bychinskii V.A. carried out research on computer modeling and analyzed the data obtained. Nemchinova N.V. wrote the manuscript and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir V. Somov,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, Russia;
e-mail: comob-boba@yandex.ru

Nina V. Nemchinova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, Russia;
✉ e-mail: ninavn@yandex.ru

Valerii A. Bychinskii

Cand. Sci. (Geology and Mineralogy),
Senior Researcher,
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1A Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia;
Associate Professor of the Department
of Oil and Gas Geology,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk 664003, Russia;
e-mail: val@igc.irk.ru

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставляется одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 4 (147) 2019

12+

Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.08.2019 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 26.
Тираж 500 экз. Заказ 178. Поз. плана 3н.

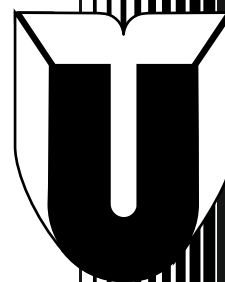
Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный исследовательский технический университет
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019

